UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

JÚLIO CÉSAR ALVES BARROS

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DO ESTADO TRÓFICO (IET) ATRAVÉS DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A NO RESERVATÓRIO MATEUS VIEIRA EM TAQUARITINGUA DO NORTE-PE UTILIZANDO IMAGENS DO SENTINEL-2

Caruaru-PE
2025

JÚLIO CÉSAR ALVES BARROS

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DO ESTADO TRÓFICO (IET) ATRAVÉS DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A NO RESERVATÓRIO MATEUS VIEIRA EM TAQUARITINGUA DO NORTE-PE UTILIZANDO IMAGENS DO SENTINEL-2

Trabalho de Defesa defendido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.
Área de concentração: Tecnologia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Gilson Lima da Silva.

Caruaru-PE
2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Barros, Júlio César Alves.
Determinação do índice do estado trófico (IET) através da concentração de Clorofila-A no reservatório Mateus Vieira em Taquaritingua do Norte-PE utilizando imagens do Sentinel-2 / Júlio César Alves Barros. - Recife, 2025.
116 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2025.
Orientação: Gilson Lima da Silva.
Inclui referências e anexos.

1. Eutrofização; 2. Sensoriamento remoto; 3. Sentinel-2; 4. IET; 5. Qualidade da água. I. Silva, Gilson Lima da. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JÚLIO CÉSAR ALVES BARROS

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DO ESTADO TRÓFICO (IET) ATRAVÉS DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A NO RESERVATÓRIO MATEUS VIEIRA EM TAQUARITINGUA DO NORTE-PE UTILIZANDO IMAGENS DO SENTINEL-2

Trabalho de Defesa defendido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gilson Lima da Silva
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Érika Pinto Marinho
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Érika Alves Tavares Marques
CIA Brasileira de Trens Urbanos- CBTU/ Recife-PE

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, assim como está escrito em Romanos 11.36 que diz: “Porque dele, e por meio dele, e para ele são todas as coisas. A ele, pois, a glória eternamente. Amém.”

À minha esposa, Marina Barros, por vivenciar comigo as dificuldades diárias durante a construção deste título. Seu apoio incondicional, suas palavras de incentivo e sua certeza de que todo esforço valeria a pena foram fundamentais para que eu seguisse em frente. Sou imensamente grato por sua presença e por sempre me lembrar que, no final, eu colheria os frutos desse trabalho.

À minha mãe, Eulina Alves, por acreditar em mim desde a graduação e por nunca duvidar de que tudo seria possível. Pelo seu sacrifício, por renunciar a seus próprios sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Sou imensamente grato por todo o amor e dedicação que sempre me ofereceu.

Às minhas irmãs, Janaína e Jayrlla Barros, por compartilharem comigo cada desafio ao longo dessa jornada. Sempre compreenderam as dificuldades e, em vez de se oporem, estiveram ao meu lado, me motivando a superar cada obstáculo. Sou profundamente grato por tudo e sempre vou amar vocês.

Aos meus avós, Clineu Barros (*in memoriam*) e Maria Barros, pelo amor incondicional, cuidado, incentivo e sábios conselhos. Sou grato a Deus pela vida de vocês, pois são meus exemplos e sempre os amarei.

Aos demais amigos e familiares, meu sincero agradecimento pela torcida, pela compreensão diante das minhas ausências e por cada mensagem ou palavra de apoio. Sou imensamente grato pela vida de cada um de vocês.

Ao meu orientador, Dr. Gilson Lima, expresso minha profunda gratidão pela oportunidade de trilhar esta jornada sob sua orientação. Sua contribuição foi inestimável, e suas orientações elevaram significativamente a qualidade desta pesquisa. Da mesma forma, agradeço ao meu coorientador, Vitor Aragão, pelo suporte e pelas contribuições essenciais ao longo deste trabalho. Além disso, sou grato ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e

Ambiental (PPEGCAM) por proporcionar um ambiente enriquecedor para o crescimento pessoal, acadêmico e profissional, impactando positivamente tanto os pesquisadores quanto a sociedade.

Por fim, e não menos importante, agradeço à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pelo suporte fundamental na realização desta pesquisa, proporcionando o apoio financeiro necessário para o aprimoramento do instrumento de investigação.

"Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os
seus planos serão bem-sucedidos."
Provérbios 16:3

RESUMO

A água é um recurso vital, cuja qualidade tem sido crescentemente comprometida por atividades antrópicas e crescimento socioeconômico desordenado. O monitoramento tradicional da qualidade da água, especialmente em relação à eutrofização, é oneroso e demorado para órgãos públicos. Diante disso, este estudo propõe e aplica o sensoriamento remoto e índices espectrais como ferramentas alternativas para um monitoramento mais eficiente e contínuo. O objetivo principal foi determinar o Índice de Estado Trófico (IET) do Reservatório de Mateus Vieira, em Taquaritinga do Norte, Pernambuco, utilizando dados do satélite Sentinel-2. A metodologia envolveu a aquisição e processamento de imagens do Sentinel-2 via *Google Earth Engine* (GEE), utilizando o *dataset Harmonized Sentinel-2 MSI Level-2A*. Foram calculados os índices NDWI, NDVI e NDCI para avaliar o estado do reservatório e, consequentemente, o IET. A análise foi realizada ao longo de um período de 7 anos (2018-2025), com uma data por ano selecionada com base em um percentual de nuvens inferior a 10%, garantindo uma série temporal representativa. Os resultados revelaram que o Reservatório de Mateus Vieira foi classificado predominantemente como Hipereutrófico, com variações significativas no IET ao longo do período analisado, indicando a persistência de condições de alta eutrofização. Essa condição é atribuída a múltiplos fatores, incluindo a variação sazonal de precipitação, o acúmulo excessivo de nutrientes, a presença de matéria orgânica e o despejo inadequado de esgoto. A eutrofização hipereutrófica observada nos últimos anos tem gerado impactos socioeconômicos e ambientais significativos para os municípios abastecidos pelo reservatório. Este estudo demonstra a robustez e a aplicabilidade do sensoriamento remoto como uma possibilidade de ferramenta eficaz e econômica para o monitoramento da qualidade da água em larga escala, fornecendo subsídios cruciais para a identificação precoce de alterações e a implementação de medidas de gestão mais eficientes e sustentáveis para a preservação desse recurso essencial.

Palavras-chave: Eutrofização, Sensoriamento Remoto, Sentinel-2, IET, Qualidade da Água.

ABSTRACT

Water is a vital resource, whose quality has been increasingly compromised by anthropogenic activities and disorderly socioeconomic growth. Traditional water quality monitoring, especially regarding eutrophication, is costly and time-consuming for public agencies. Therefore, this study proposes and applies remote sensing and spectral indices as alternative tools for more efficient and continuous monitoring. The main objective was to determine the Trophic State Index (TSI) of the Mateus Vieira Reservoir, in Taquaritinga do Norte, Pernambuco, using data from the Sentinel-2 satellite. The methodology involved the acquisition and processing of Sentinel-2 images via Google Earth Engine (GEE), using the Harmonized Sentinel-2 MSI Level-2A dataset. The NDWI, NDVI and NDCI indices were calculated to assess the state of the reservoir and, consequently, the TSI. The analysis was conducted over a 7-year period (2018-2025), with one date per year selected based on a cloud percentage below 10%, ensuring a representative time series. The results revealed that the Mateus Vieira Reservoir was predominantly classified as Hypereutrophic, with significant variations in the IET throughout the analyzed period, indicating the persistence of high eutrophication conditions. This condition is attributed to multiple factors, including seasonal variation in precipitation, excessive accumulation of nutrients, the presence of organic matter, and inadequate sewage disposal. The hypereutrophic eutrophication observed in recent years has generated significant socioeconomic and environmental impacts for the municipalities supplied by the reservoir. This study demonstrates the robustness and applicability of remote sensing as a potential effective and cost-effective tool for large-scale water quality monitoring, providing crucial support for the early identification of changes and the implementation of more efficient and sustainable management measures for the preservation of this essential resource.

Keywords: Eutrophication, Remote Sensing, Sentinel-2, IET, Water Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percurso da luz ao sol, e o corpo d'água ao sensor orbital. 23
Figura 2 - Citações entre autores relacionados à eutrofização e o satélite Sentinel-2 na base Scopus e Web of Science. 34
Figura 3 - Coautores relacionados com à eutrofização e o satélite Sentinel-2 pelas bases de dados. 36
Figura 4 - Publicações relacionadas à eutrofização e o satélite Sentinel-2 por países segundo as bases de dados de coautoria. 37
Figura 5 - Mapa de localização do Reservatório Mateus Vieira. 40
Figura 6 - Painel de análise do NDCI do reservatório de Mateus Vieira durante o período de estudo. 51
Figura 7 - Painel de análise da clorofila-a no reservatório de Mateus Vieira durante o período de estudo. 56
Figura 8 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 27-12-2018. 61
Figura 9 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 17-03-2019. 63
Figura 10 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 17-07-2019. 64
Figura 11 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 15-02-2020. 66
Figura 12 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 21-06-2020. 67
Figura 13 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 17-05-2021. 69
Figura 14 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 21-11-2021. 70
Figura 15 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 14-07-2023. 72
Figura 16 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 02-10-2023. 73
Figura 17 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 12-08-2024. 75

Figura 18 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 30-11-2024. 76
Figura 19 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 24-01-2025. 78
Figura 20 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 19-04-2025. 79
Figura 21 - Painel com série histórica do IET do Reservatório Mateus Vieira. 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro de datas selecionadas mediante os critérios metodológicos. 42
Tabela 2 - Reclassificação do Índice do Estado Trófico (IET). 47
Tabela 3 - Variação do volume percentual do Reservatório de Mateus Vieira (2018 – 2025). 54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variação do espaço-temporal do NDCI no reservatório durante o período de estudo. 48
Quadro 2 - Variação do espaço-temporal do volume no reservatório durante o período de estudo. 55
Quadro 3 - Área absoluta categorizada pelo IET do Reservatório Mateus Vieira durante o período de estudo. 81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AlgaeMap	*Algae Bloom Monitoring Application*
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Climas
CDOM	*Colored Dissolved Organic Matter*
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Chl-a	Clorofila-a
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRH	Companhia Pernambucana de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	Agência Espacial Europeia
GEE	*Google Earth Engine*
IAP	Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público
IB	Índice de Balneabilidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICB	Índice da Comunidade Bentônica
ICF	Índice da Comunidade Fitoplanctônica e
ICFRES	Índice da Comunidade Fitoplanctônica em Reservatórios
ICFRIO	Índice da Comunidade Fitoplanctônica em Rios
ICZres	Índice da Comunidade Zooplanctônica para Reservatórios
IET	Índice de Estado Trófico
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPMCA	Índice de Variáveis Mínimas para a Preservação da Vida Aquática
IQA	Índice de Qualidade das Águas
ISTO	Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas
IVA	Índice de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática e de Comunidades Aquáticas
MCI	*Mass Contrast Index*
MPH	*Maximum Pigment Algorithm*

MSI	*MultiSpectral Imager*
NDCI	*Normalized Differential Index of Chlorophyll-a*
NDVI	*Normalized Difference Vegetation Index*
NDWI	*Normalized Difference Water Index*
NIR	Infravermelho próximo
ODS	Objetivo do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
POAs	Propriedades Ópticas Aparentes
POIs	Propriedades Ópticas Inerentes
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SST	Sólidos Suspensos Totais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 7
2. OBJETIVOS 12
2.1 Objetivo Geral 12
2.2 Objetivos Específicos 12
3. FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA 13
3.1 Qualidade da Água 13
3.1.1 Índices de Qualidade das Águas e suas Aplicações na Gestão Ambiental 15
3.2 Aspectos Legais 18
3.3 Eutrofização 20
3.4 Sensoriamento Remoto 22
3.5 Sentinel-2 26
3.6 Clorofila-a 28
4. REVISÃO SISTEMÁTCA 33
4.1 Análise Bibliométrica 33
5. METODOLOGIA 38
5.1 Área de Estudo 38
5.2 Levantamento e Processamento dos Dados 41
5.2.1 *Google Earth Engine* (GEE) 41
5.2.2 Datas de Estudo 42
5.2.3 Análise da Série Histórica do NDCI 43
5.2 Determinação do Índice do Estado Trófico (IET) 45
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES 48
6.1 Índice *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI) 48
6.2 Distribuição Espaço-Temporal Clorofila-A (Chl-a) 56
6.3 Índice do Estado Trófico (IET) 59

6.3.1 IET do Reservatório Mateus Vieira 60
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 87
7.1 Recomendações de trabalhos futuros 88
REFERÊNCIAS 89
ANEXOS 99
ANEXO A – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 27-12-2018. 99
ANEXO B – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 17-07-2019. 100
ANEXO C – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 17-03-2019. 100
ANEXO D – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 15-02-2020. 101
ANEXO E – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 21-06-2020. 101
ANEXO F – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 17-05-2021. 102
ANEXO G – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 21-11-2021. 102
ANEXO H – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 14-07-2023. 103
ANEXO I – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 02-10-2023. 103
ANEXO J – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 12-08-2024. 104
ANEXO K – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 30-11-2024. 104
ANEXO L – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 24-01-2025. 105

ANEXO M – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 19-04-2025. 105

1. INTRODUÇÃO

A escassez hídrica representa um grande desafio global, agravado pela diminuição dos rios, contaminação e desperdício, o que torna a gestão da água ainda mais complexa. Para reverter essa situação e assegurar um futuro sustentável, é essencial adotar medidas de preservação e controle ambiental. Embora a água possa parecer abundante, apenas 2,5% dela é potável, o que ressalta a urgência de ações efetivas de proteção dos recursos hídricos (ROCHA; SILVA, 2020).

O Brasil ocupa uma posição favorável em termos de recursos hídricos, detendo aproximadamente 12% da água doce disponível no mundo. Contudo, essa riqueza hídrica não está distribuída de maneira uniforme pelo país, concentrando-se principalmente na região Norte, caracterizada por uma baixa densidade populacional. Em contrapartida, as regiões mais densamente habitadas possuem menos de 3% dos recursos hídricos do Brasil (NOVO, 2019).

Outro aspecto a ser considerado diz respeito à qualidade desse recurso, uma vez que muitos corpos d'água estão enfrentando intervenções humanas, tais como o descarte de efluentes industriais e domésticos sem tratamento prévio, manejo inadequado de resíduos, uso excessivo de pesticidas que podem se infiltrar no solo e atingir as águas subterrâneas ou serem transportados por eventos de precipitação, além do transporte de partículas do solo para o corpo hídrico (RODRIGUES, 2022).

Para viabilizar uma gestão eficiente dos recursos hídricos e embasar a tomada de decisões voltadas à mitigação dos impactos causados pelas atividades humanas na qualidade da água, é fundamental compreender as características dos corpos hídricos ao longo do tempo. No entanto, a disponibilidade de informações sobre esses ambientes varia significativamente entre as regiões, resultando em dados desiguais e, em alguns casos, insuficientes para uma análise precisa. Além disso, determinados cursos d’água permanecem sem qualquer monitoramento devido a fatores como localização geográfica remota, dificuldades de acesso e limitações de infraestrutura e recursos para a realização de estudos sistemáticos. Essa lacuna de informações compromete a implementação de estratégias eficazes para a preservação e recuperação da qualidade da água, evidenciando a necessidade de aprimoramento nas metodologias de monitoramento e avaliação desses ecossistemas (BARROSO *et al*., 2024).

Entretanto, o saneamento refere-se ao conjunto de medidas para salvaguardar e aprimorar as condições ambientais e humanas, englobando a gestão e tratamento adequado de resíduos sólidos e líquidos, disponibilidade de água potável, ordenamento e regulação do uso

do solo, iniciativas para promover e aprimorar o bem-estar, controle de agentes transmissores de doenças e manejo de águas pluviais em áreas urbanas (BAZAANAH; MOTHAPO, 2023).

A análise da qualidade da água é conduzida por meio de medições feitas em amostras coletadas, possibilitando a mensuração de suas características físicas, químicas ou biológicas em um local específico e em um momento determinado. No entanto, esses métodos requerem um investimento considerável em termos de tempo e recursos financeiros, e muitas vezes não oferecem uma representação abrangente das condições espaciais, o que se torna uma limitação significativa na avaliação da qualidade dos recursos hídricos (BUMA; LEE, 2020).

Reduzir a quantidade de amostras e o número de campanhas de monitoramento, visando um monitoramento mais econômico dos corpos d'água, pode gerar dúvidas quanto à possível falta de representação da elevada variabilidade funcional inerente aos ecossistemas aquáticos complexos (IBANHEZ *et al*., 2019).

Nesse contexto, o uso de técnicas de sensoriamento remoto por satélite surge como uma alternativa eficaz para a avaliação e o monitoramento de corpos d'água, uma vez que a frequência de aquisição das imagens orbitais é significativamente maior em comparação às campanhas de monitoramento tradicionais, que geralmente ocorrem em intervalos bimestrais, semestrais ou até anuais (AGNOLI *et al*.,2023).

Conforme Pereira *et al*. (2022), a integração de dados de sensoriamento remoto obtidos pelo satélite Sentinel-2 com algoritmos bio-ópticos tem se mostrado uma abordagem eficiente para o monitoramento automatizado da qualidade da água. A aplicação de algoritmos como o Índice de Clorofila-a, o *Normalized Differential Index of Chlorophyll-a* (NDCI) e o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) permite a modelagem da reflectância espectral da água e da vegetação aquática, possibilitando a detecção e análise da distribuição espacial da Clorofila-a e de macrófitas em ecossistemas aquáticos. Essa metodologia favorece a identificação de áreas críticas, contribuindo para a caracterização dos processos que afetam a qualidade dos recursos hídricos. Além disso, a validação desses algoritmos reforça sua aplicabilidade na geração de indicadores ambientais que auxiliam na formulação de estratégias para a gestão sustentável dos corpos d’água, permitindo a implementação de medidas corretivas e preventivas de forma mais eficaz.

O uso de técnicas de sensoriamento remoto por satélite tem se destacado como uma ferramenta essencial para o monitoramento e análise das alterações físico-químicas em corpos d’água, permitindo uma abordagem espaço-temporal que facilita a identificação de mudanças ambientais ao longo do tempo (SENT, 2021). Dentre os diversos parâmetros que podem ser analisados, a Clorofila-a, um pigmento fotossintético presente em organismos fotoautotróficos

como vegetais, algas e cianobactérias, é amplamente utilizada como indicador da qualidade da água (NEIL *et al*., 2019). Através da observação por satélite, torna-se possível mapear e quantificar a concentração de Clorofila-a em diferentes ecossistemas aquáticos, permitindo a detecção de alterações associadas à atividade antrópica, variações climáticas e processos naturais. Essa abordagem possibilita uma análise sistemática e contínua dos corpos hídricos, contribuindo para a compreensão dos impactos ambientais e auxiliando na formulação de estratégias para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

A Clorofila-a (Chl-a) é amplamente utilizada como um bioindicador da qualidade da água, pois apresenta uma forte correlação com o estado trófico dos corpos hídricos. Sua concentração reflete as alterações na disponibilidade de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, que podem desencadear o crescimento excessivo de organismos autotróficos, como algas e cianobactérias. Esse aumento na biomassa fitoplanctônica pode resultar em efeitos adversos, como a redução da transparência da água, alterações nos ciclos biogeoquímicos e impactos na fauna aquática devido à diminuição do oxigênio dissolvido. Assim, a quantificação da Clorofila-a permite avaliar a resposta dos ecossistemas aquáticos a fatores estressores ambientais, proporcionando informações fundamentais para o monitoramento da qualidade da água e a implementação de estratégias de gestão e conservação (JARGAL; LEE; AN, 2021).

No contexto da análise da Chl-a como bioindicador da qualidade da água, sua relação com índices bio-ópticos tem sido amplamente investigada para compreender os padrões de variação espacial e temporal em ambientes aquáticos. O *Normalized Difference Chlorophyll-a Index* (NDCI), destaca-se como uma ferramenta robusta e eficiente para estimar a concentração de Chl-a, utilizando a refletância diferencial entre as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, que são sensíveis à presença de biomassa fitoplanctônica. Esse índice possibilita a detecção de variações sutis na concentração de pigmentos fotossintéticos, mesmo em corpos d'água com alta turbidez, oferecendo uma vantagem significativa em relação a métodos tradicionais de monitoramento. A aplicação do *Normalized Difference Chlorophyll-a Index* é fundamental para o monitoramento da qualidade da água em larga escala e com alta frequência temporal, permitindo identificar precocemente áreas com alta produtividade primária, potenciais eventos de eutrofização e proliferação de algas nocivas. Além de sua eficácia para diagnósticos ambientais, o NDCI contribui para o aprimoramento de estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos, fornecendo subsídios essenciais para a formulação de políticas públicas e ações de conservação ambiental (GUIMARÃES; NETO, 2023)

A entrada excessiva de nutrientes nos corpos d'água pode estar associada ao transporte de nutrientes e outros elementos pelas águas das chuvas, bem como ao lançamento irregular de

efluentes sanitários e industriais sem tratamento prévio. Isso pode resultar na degradação da qualidade da água e na diminuição da diversidade biológica, levando à desestabilização dos serviços e funções do ecossistema (XIAO *et al*., 2024).

Segundo Rodrigues (2022), nos reservatórios, o processo de deterioração é intensificado devido ao longo período de armazenamento e à reduzida velocidade do fluxo de água, criando condições propícias para o crescimento de algas, cianobactérias e outros organismos.

Tendo em vista, a temática e baseando-se na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), o Reservatório de Mateus Vieira, situado na Bacia do Capibaribe, é uma infraestrutura essencial para o armazenamento de água, desempenhando um papel fundamental no abastecimento hídrico da região, especialmente em períodos de seca prolongada. Além de regular o fluxo do Rio Riacho da Bica, o reservatório também contribui para a estabilidade econômica e social das comunidades locais ao assegurar a disponibilidade de água para consumo humano e agrícola.

Ainda de acordo com a APAC (2024), o reservatório é constantemente monitorado para garantir sua segurança e eficácia. Sua existência não só beneficia a população ao fornecer água para diversas finalidades, como também desempenha um papel ecológico importante, sustentando habitats aquáticos e ajudando na recarga dos aquíferos locais.

A aplicação de tecnologias de sensoriamento remoto visa fornecer uma alternativa moderna e eficiente para o monitoramento ambiental, permitindo a detecção precoce de alterações na qualidade da água e contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos na região.

Considerando a importância do monitoramento contínuo para avaliar o grau de eutrofização no reservatório de Mateus Vieira, sua seleção foi baseada nas informações fornecidas por profissionais da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) e por sua relevância no contexto do agreste pernambucano. Este reservatório, com um volume máximo de armazenamento de 2.752.200 m^3, desempenha um papel crucial no abastecimento de água das cidades pertencentes à bacia do Capibaribe, incluindo Taquaritinga do Norte, Santa Cruz do Capibaribe e Vertentes. Além disso, a sua localização estratégica o torna um recurso essencial para atender às demandas hídricas da região, que frequentemente enfrenta desafios relacionados à escassez de água e à gestão sustentável dos recursos disponíveis.

Este estudo tem como objetivo desenvolver uma metodologia para estimar a concentração de Clorofila-a no reservatório de Mateus Vieira, em Taquaritinga do Norte-PE, por meio de imagens do satélite Sentinel-2. A Clorofila-a, um pigmento fotossintético presente em organismos autotróficos, é amplamente utilizada como indicador da biomassa

fitoplanctônica em ambientes aquáticos. Seu aumento está diretamente associado à disponibilidade de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, que favorecem o crescimento de algas e cianobactérias. O acúmulo excessivo desses organismos pode comprometer a qualidade da água, resultando na redução da transparência, no aumento da demanda bioquímica de oxigênio e na liberação de substâncias potencialmente tóxicas. Dessa forma, a estimativa eficiente da concentração de Clorofila-a possibilita a identificação precoce de alterações na qualidade da água, permitindo a adoção de medidas de manejo e monitoramento mais eficazes.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar o Indice do Estado Trófico (IET) através da concentração de clorofila-a no reservatório Mateus Vieira em Taquaritinga do Norte-PE utilizando imagens do satélite sentinel-2.

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar a concentração de Clorofila-a a partir das imagens através do Sentinel-2.
- Calcular os índices espectrais *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI), utilizados para a detecção e quantificação de biomassa fitoplanctônica.
- Determinar o Índice de Estado Trófico (IET) do Reservatório Mateus Vieira com base nas imagens do satélite Sentinel-2, empregando o índice NDCI como ferramenta para avaliar o nível de eutrofização do corpo d'água.

3. FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

3.1 Qualidade da Água

A água desempenha um papel crucial, cobrindo aproximadamente 70% da superfície terrestre. Como parte integrante da biosfera, os ecossistemas aquáticos podem ser classificados como ambientes de água salgada, doce ou salobra, e ainda podem ser subdivididos em ambientes lóticos ou lênticos (PIZANI, 2023).

O Brasil se destaca como um dos países com maior disponibilidade de recursos hídricos no mundo, abrigando cerca de 12% da reserva global de água doce. No entanto, essa distribuição é desigual, sendo que aproximadamente 70% desse volume está concentrado na Região Amazônica, enquanto outras áreas do país enfrentam limitações hídricas significativas. Esse cenário evidencia a necessidade de políticas públicas voltadas para a gestão eficiente dos recursos hídricos, considerando tanto a preservação dos mananciais quanto a mitigação dos impactos causados pelo uso intensivo da água em diferentes setores (ANA, 2024).

No território nacional, a regulamentação referente à administração dos recursos hídricos e saneamento ganhou destaque por meio da criação do Código de Águas (Decreto nº 24.643/1934), da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e da atualização do Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020).

A gestão dos recursos hídricos no Brasil é regulamentada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas. Essa legislação estabelece diretrizes para o uso sustentável da água, fundamentando-se no princípio de que a água é um bem de domínio público, além de um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. Dessa forma, a PNRH busca garantir a utilização racional dos recursos hídricos, conciliando as demandas ambientais, sociais e econômicas para a preservação e o manejo sustentável das águas no país (BRASIL, 1997).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) definiu a bacia hidrográfica como a unidade territorial de referência para a implementação e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Entre seus objetivos fundamentais, destacam-se a garantia da disponibilidade hídrica para as atuais e futuras gerações, assegurando padrões de qualidade compatíveis com os diferentes usos, e a promoção do uso racional e integrado dos recursos hídricos. Esse último aspecto inclui o aproveitamento para o transporte

aquaviário, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável e à necessidade de uma gestão eficiente e equilibrada dos mananciais.

Conforme o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), destaca a importância crucial da gestão sustentável da água e saneamento. Preservar a água é vital, pois é um recurso essencial para a vida, ecossistemas e desenvolvimento socioeconômico. Ao abordar desafios como escassez e poluição, a implementação efetiva do ODS 6 não apenas garante o acesso à água potável, mas também promove saúde, reduz a pobreza e protege os ecossistemas. A colaboração entre governos, setor privado e sociedade civil é fundamental para atingir essas metas e garantir um futuro sustentável para todos (IPEA, 2024).

No Brasil, a presença de muitos reservatórios artificiais são uma consequência da matriz energética nacional, que tem na geração hidrelétrica sua principal fonte de produção. Esse cenário gera variações no volume dos reservatórios, influenciadas por fatores econômicos e climáticos, como a demanda por energia elétrica e a necessidade de recursos hídricos para irrigação. Essas flutuações podem impactar a disponibilidade hídrica, a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos, exigindo estratégias de gestão que conciliem a segurança energética com a preservação ambiental e o uso sustentável da água (SOUZA *et al*., 2023).

Com isso, as atividades humanas e as transformações na paisagem exercem uma influência significativa sobre os ciclos hidrológicos, podendo causar alterações nos sistemas aquáticos e comprometer tanto a qualidade quanto a disponibilidade dos recursos hídricos. Nesse contexto, substâncias introduzidas nos ecossistemas em decorrência dessas intervenções, quando dissolvidas ou suspensas na água, tendem a permanecer no ambiente por longos períodos. Esse fenômeno pode agravar processos de degradação ambiental, afetando o equilíbrio ecológico e a capacidade de recuperação dos corpos d’água, tornando essencial o monitoramento e a adoção de estratégias de gestão para mitigar seus impactos (RADIN; SORIA-PERPINYA; DELEGIDO, 2020).

A contaminação dos recursos hídricos pode ocorrer em diferentes fases e manifestar-se por meio da presença de substâncias indesejáveis, cuja origem pode ser tanto antrópica quanto natural. Entre as fontes antropogênicas, destacam-se os resíduos provenientes de atividades industriais, agrícolas e domésticas, enquanto os processos naturais incluem o aporte de materiais transportados pelo vento e pela chuva. Esses elementos podem comprometer a qualidade da água, afetando ecossistemas aquáticos e a disponibilidade hídrica para diferentes

usos, tornando essencial a implementação de medidas de monitoramento e controle da poluição (PIZANI, 2023).

Entretanto os impactos nos recursos hídricos estão intimamente ligados à ocupação do solo, com destaque para as regiões urbanas e agrícolas, sendo estas as principais responsáveis pela considerável poluição hídrica. No caso das áreas urbanas, isso se deve à ausência de serviços de saneamento, coleta apropriada de resíduos e tratamento de esgoto, resultando na disposição de detritos e efluentes não tratados nos corpos d'água. Já no contexto agrícola, a principal contribuição provém do uso de fertilizantes e do aumento do transporte de sedimentos para os corpos hídricos (MELLO *et al.*, 2020).

Quando a utilização da fonte hídrica é voltada para o fornecimento de água potável ou para atividades recreativas diretas, é imperativo realizar o monitoramento e avaliação da qualidade da água. Isso se deve ao fato de que uma água de qualidade inferior pode propiciar a disseminação de doenças originadas por micro-organismos (LENCHA; TRÄNCKNER; DANANTO, 2021). Além das questões relacionadas ao consumo humano, um reservatório que contenha água comprometida em termos de qualidade implica em um ambiente aquático com seu ecossistema degradado (CAMPOS; LEITE, 2019).

O monitoramento e a análise das características físicas, químicas e biológicas das águas continentais são fundamentais para a compreensão dos ecossistemas aquáticos, permitindo a avaliação dos impactos das mudanças ambientais e a previsão de possíveis alterações futuras. Essas ações desempenham um papel essencial tanto no avanço do conhecimento científico quanto na formulação de políticas públicas voltadas à preservação e gestão sustentável dos recursos hídricos. A obtenção de dados precisos e contínuos sobre a qualidade da água possibilita a identificação de tendências ambientais e subsidia a implementação de estratégias eficazes para a mitigação de impactos e a conservação dos ecossistemas aquáticos (MOFIJUR *et al*., 2024).

3.1.1 Índices de Qualidade das Águas e suas Aplicações na Gestão Ambiental

Os índices de qualidade das águas são instrumentos fundamentais para a avaliação e gestão dos recursos hídricos, permitindo a integração de diversas variáveis ambientais em um único valor que reflete o estado de saúde dos corpos d'água. Esses índices são essenciais para a formulação de políticas públicas, pois oferecem uma visão sistêmica e acessível da qualidade da água, facilitando a comunicação com o público em geral e os gestores ambientais. Ainda

segundo a CETESB (2022), destacam-se o Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público (IAP), que avalia a adequação da água para consumo humano; o Índice do Estado Trófico (IET), que classifica o grau de eutrofização dos corpos d'água; o Índice de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática e de Comunidades Aquáticas (IVA), que avalia a qualidade da água para a preservação da fauna e flora aquáticas; o Índice da Comunidade Fitoplanctônica (ICF), que analisa a dominância e densidade de fitoplâncton; o Índice da Comunidade Zooplanctônica para Reservatórios (ICZres), que relaciona a composição Zooplanctônica com o estado trófico; o Índice da Comunidade Bentônica (ICB), que avalia a estrutura das comunidades bentônicas; e o Índice de Balneabilidade (IB), que determina a segurança da água para recreação de contato primário. Esses índices, em conjunto, permitem uma avaliação abrangente da qualidade das águas, considerando diferentes usos e impactos ambientais (CETESB, 2022).

Ainda segundo a CETESB (2022), o Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público (IAP) é um indicador que avalia a qualidade da água bruta captada para abastecimento público, considerando tanto variáveis básicas, como temperatura, pH e oxigênio dissolvido, quanto a presença de substâncias tóxicas e organolépticas. O IAP é calculado a partir do produto entre o Índice de Qualidade das Águas (IQA) e o Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas (ISTO), que inclui parâmetros como metais pesados e o potencial de formação de Trihalometanos. Esse índice é fundamental para garantir que a água bruta captada possa ser tratada de forma eficiente, atendendo aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação brasileira.

O autor destaca que o Índice do Estado Trófico (IET) tem como objetivo classificar os corpos d'água de acordo com o grau de trofia, ou seja, o enriquecimento por nutrientes e seus efeitos relacionados ao crescimento excessivo de algas e cianobactérias. O IET é calculado com base nas concentrações de clorofila *a* e fósforo total, que representam, respectivamente, a resposta do corpo d'água ao enriquecimento por nutrientes e o potencial de eutrofização. Esse índice é crucial para monitorar a saúde dos ecossistemas aquáticos, especialmente em reservatórios e rios, onde o excesso de nutrientes pode levar à proliferação de florações algáceas e à degradação da qualidade da água.

O Índice de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática e de Comunidades Aquáticas (IVA) foi desenvolvido para avaliar a qualidade da água visando a proteção da fauna e flora aquáticas. O IVA integra o Índice de Variáveis Mínimas para a Preservação da Vida Aquática (IPMCA), que considera parâmetros como oxigênio dissolvido, pH e toxicidade, com o Índice do Estado Trófico (IET), que avalia o grau de eutrofização. Esse índice é

particularmente relevante para corpos d'água enquadrados nas classes 1, 2 e 3 da Resolução CONAMA 357/05, que têm como objetivo a preservação das comunidades aquáticas. O IVA fornece informações sobre a qualidade da água em termos ecotoxicológicos e de trofia, auxiliando na gestão sustentável dos recursos hídricos (CETESB, 2022).

De acordo com a CETESB (2022), o Índice da Comunidade Fitoplanctônica (ICF) é utilizado para avaliar a qualidade da água com base na dominância de grupos Fitoplanctônicos, na densidade de organismos e no Índice do Estado Trófico (IET). Esse índice é aplicado tanto em rios (ICFRIO) quanto em reservatórios (ICFRES), e sua classificação varia de "Ótima" a "Péssima", dependendo da dominância de grupos como cianobactérias, clorofíceas e diatomáceas. O ICF é uma ferramenta importante para o diagnóstico da qualidade da água, especialmente em ambientes onde o crescimento excessivo de algas pode indicar problemas de eutrofização.

O órgão estabelece para o Índice da Comunidade Zooplanctônica para Reservatórios (ICZres) relaciona a razão entre o número de calanóides e ciclopóides com o Índice do Estado Trófico (IET) para clorofila-a. Esse índice é utilizado para avaliar a qualidade da água em reservatórios, classificando-a em categorias que variam de "Boa" a "Péssima". A presença de grupos zooplanctônicos, como rotíferos, cladóceros e copépodes, é essencial para a aplicação do ICZres, que fornece informações sobre a saúde do ecossistema aquático e o impacto da eutrofização nas comunidades zooplanctônicas.

Ainda também, o Índice da Comunidade Bentônica (ICB) avalia a qualidade do habitat aquático com base na estrutura das comunidades bentônicas, utilizando descritores como riqueza de espécies, diversidade de *Shannon-Wiener* e a razão entre táxons sensíveis e tolerantes. Esse índice é aplicado em diferentes ambientes, como zonas sublitorais e profundais de reservatórios, e em rios. O ICB é uma ferramenta valiosa para o biomonitoramento, pois reflete as condições ambientais e o impacto de poluentes nas comunidades bentônicas, que são sensíveis às mudanças na qualidade da água e do sedimento.

Por fim, o Índice de Balneabilidade (IB) é utilizado para avaliar a qualidade da água em praias de águas interiores, como rios e reservatórios, visando a recreação de contato primário. Esse índice é baseado na concentração de indicadores microbiológicos, como coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*, e classifica as praias em categorias que variam de "Excelente" a "Imprópria". O IB é fundamental para garantir a segurança dos banhistas e a qualidade das águas recreativas, sendo amplamente utilizado no monitoramento de praias no Estado de São Paulo (CETESB, 2022).

3.2 Aspectos Legais

A Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), juntamente com suas atualizações, estabelece a classificação dos corpos d'água, os parâmetros para o lançamento de efluentes e as diretrizes para a preservação dos recursos hídricos. No contexto do monitoramento ambiental, essa normativa define essa atividade como a observação sistemática de indicadores quantitativos e qualitativos da água, realizada de forma contínua ou em intervalos regulares. O objetivo desse acompanhamento é avaliar as condições dos corpos hídricos ao longo do tempo, possibilitando a adoção de medidas adequadas para a gestão e conservação da qualidade da água (CONAMA, 2011).

Assim, para cada categoria de classificação dos corpos hídricos, foram estabelecidos critérios baseados em variáveis explicativas e quantitativas, com a definição de intervalos de concentração considerados adequados para a manutenção da qualidade da água. Entre as variáveis explicativas, destacam-se fatores como a origem da água, o uso predominante do recurso e as características geomorfológicas da bacia hidrográfica. Já entre as variáveis quantitativas, incluem-se parâmetros físico-químicos e biológicos, como turbidez, concentração de oxigênio dissolvido, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total e Chl-a. Dentre esses aspectos, o estado trófico assume papel fundamental, pois reflete a disponibilidade de nutrientes e a produtividade biológica do ambiente aquático. O monitoramento desses indicadores possibilita a identificação de alterações na qualidade da água e fornece subsídios para a implementação de estratégias eficazes de gestão e conservação dos recursos hídricos (CPRH, 2024).

Ainda que as análises realizadas no local sejam mais exatas e amplamente utilizadas do que aquelas obtidas de maneira indireta, como por meio do sensoriamento remoto, elas têm uma natureza mais específica, o que significa que podem ser restritas por diversos elementos, especialmente a dificuldade de alcançar a área de interesse, resultando em uma representação espaço-temporal limitada (MOFIJUR *et al*., 2024).

Para mitigar esses desafios, a legislação brasileira adota uma abordagem preventiva e regulatória voltada à gestão dos recursos hídricos. A Lei nº 9.433/1997, conhecida como Lei das Águas, estabelece os princípios fundamentais para a política nacional de recursos hídricos, priorizando o uso sustentável e a preservação da qualidade da água. Complementarmente, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005 define os padrões de qualidade da água, estabelecendo limites para a concentração de nutrientes em

diferentes classes de corpos hídricos. Nesse contexto, o monitoramento de parâmetros ambientais, como a Chl-a, associado a estratégias eficazes de controle das fontes de aporte de nutrientes, é fundamental para garantir a manutenção do equilíbrio ecológico e promover a gestão sustentável dos recursos hídricos no país.

A Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelece diretrizes e parâmetros para o lançamento de efluentes líquidos em corpos d'água no Brasil, atuando como um complemento à Resolução nº 357/2005. Essa normativa tem como principal objetivo a preservação da qualidade dos recursos hídricos, determinando limites máximos para a concentração de substâncias químicas e parâmetros físico-químicos que devem ser atendidos no tratamento de efluentes antes de sua disposição final no meio ambiente. Além disso, a resolução enfatiza a importância do monitoramento contínuo e da implementação de tecnologias eficientes de tratamento, visando reduzir os impactos ambientais. Dessa forma, a regulamentação busca equilibrar a expansão das atividades produtivas com a conservação dos corpos d'água, promovendo o uso sustentável dos recursos hídricos (CONAMA, 2011).

A Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece limites específicos para diversos parâmetros de qualidade dos efluentes lançados em corpos hídricos, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais e garantir a preservação dos recursos hídricos. Dentre os principais critérios, destaca-se a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que para corpos d'água de classe 3 não deve ultrapassar 60 mg/L, a fim de evitar a depleção do oxigênio dissolvido e comprometer a biota aquática. Além disso, a concentração de óleos e graxas é limitada a 20 mg/L, enquanto o teor de sólidos suspensos totais (SST) não pode exceder 100 mg/L, prevenindo o assoreamento e a deterioração da qualidade da água. A normativa também estabelece que o pH dos efluentes deve permanecer entre 5 e 9, garantindo condições adequadas para a vida aquática e reduzindo a corrosividade dos despejos. No que se refere à presença de metais pesados, são definidos limites rigorosos, como 0,002 mg/L para mercúrio, 0,5 mg/L para chumbo e 0,2 mg/L para cádmio, substâncias altamente tóxicas que representam riscos ambientais e à saúde humana. A implementação desses padrões visa assegurar a proteção dos ecossistemas aquáticos e garantir que os corpos d'água permaneçam aptos para diferentes usos, incluindo o abastecimento público e a recreação (CONAMA, 2011).

3.3 Eutrofização

De acordo CPRH (2024), a eutrofização refere-se ao processo de enriquecimento excessivo dos corpos hídricos por nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que impulsionam o crescimento exagerado de algas e plantas aquáticas. Esse fenômeno, frequentemente associado à elevação da concentração de Chl-a, um indicador-chave da biomassa fitoplanctônica, pode acarretar sérias consequências para os ecossistemas aquáticos. Entre os principais impactos estão a redução do oxigênio dissolvido, devido à decomposição da matéria orgânica, e a mortalidade de organismos aquáticos, como peixes. Além disso, essa condição prejudica o uso da água para diversas finalidades, como abastecimento humano, lazer e outras atividades econômicas, podendo ainda favorecer a proliferação de cianobactérias tóxicas.

De acordo com Li *et al*. (2020), a eutrofização é um processo que pode ocorrer tanto por causas naturais quanto em decorrência de atividades humanas, sendo esta última intensificada por intervenções antrópicas que elevam a carga de nutrientes nos ecossistemas aquáticos. Práticas como a expansão agrícola, o lançamento inadequado de efluentes domésticos e industriais, bem como a urbanização desordenada, contribuem significativamente para o aumento das concentrações de nitrogênio e fósforo na água. Esses elementos favorecem a proliferação excessiva de organismos autotróficos, como algas e cianobactérias, podendo comprometer a qualidade da água e afetar a biodiversidade aquática.

Um dos impactos mais significativos da eutrofização é o crescimento descontrolado de algas, conhecido como floração algal, que compromete a transparência da água e reduz os níveis de oxigênio dissolvido. Essa redução afeta diretamente a sobrevivência de organismos aquáticos, incluindo peixes, devido à limitação do oxigênio necessário para a respiração aeróbica. Em situações mais severas, pode ocorrer anoxia, caracterizada pela quase total ausência de oxigênio, o que favorece a produção de compostos tóxicos, como o sulfeto de hidrogênio, intensificando desequilíbrios ecológicos e prejudicando a biodiversidade aquática (AMORIM; MOURA, 2021).

A proliferação de algas também contribui para a formação de zonas mortas, áreas com concentrações de oxigênio insuficientes para sustentar a maioria das formas de vida aquática. Esses ambientes degradados são comuns em estuários e regiões costeiras, como o Golfo do México, onde a descarga de nutrientes provenientes de grandes bacias hidrográficas é mais intensa. O agravamento desse problema em escala global está associado às mudanças climáticas, que intensificam a estratificação térmica dos corpos d'água, dificultando a circulação

do oxigênio. Esse cenário reforça a urgência da adoção de estratégias de gestão de recursos hídricos para mitigar os efeitos da eutrofização (LI *et al*., 2020).

Além disso, a eutrofização provoca alterações significativas na estrutura ecológica dos ecossistemas aquáticos, afetando diretamente a composição e a diversidade das espécies. O enriquecimento excessivo de nutrientes favorece o crescimento acelerado de algumas espécies de algas, resultando na dominância dessas populações e na redução da biodiversidade. Esse desequilíbrio pode desencadear efeitos em cascata na cadeia trófica, afetando desde microrganismos até predadores de níveis tróficos superiores (SEVERIANO *et al*., 2023). A decomposição da biomassa algal acumulada aumenta a demanda química de oxigênio (DQO), agravando condições de hipóxia, caracterizadas pela baixa disponibilidade de oxigênio dissolvido, o que compromete a sobrevivência de diversas espécies e acentua os desequilíbrios ecológicos nos ecossistemas aquáticos.

Os impactos da eutrofização vão além dos ecossistemas aquáticos, gerando consequências socioeconômicas expressivas. A deterioração da qualidade da água compromete o abastecimento para consumo humano, afeta negativamente a pesca comercial e recreativa e pode reduzir o potencial turístico de regiões que dependem de lagos e rios para atividades de lazer. Além disso, a recuperação de corpos hídricos afetados por esse fenômeno representa um desafio técnico e financeiro, exigindo a adoção de medidas como a redução da carga de nutrientes, a aplicação de técnicas de aeração e a remoção da biomassa algal. Diante desse cenário, a implementação de estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos, aliada ao controle eficaz das fontes de poluição pontual e difusa, torna-se essencial para mitigar os efeitos da eutrofização e preservar a qualidade dos ambientes aquáticos (SOUZA *et al*., 2021).

A pesquisa científica sobre a eutrofização tem se concentrado na compreensão dos processos que a desencadeiam, nos fatores que intensificam sua progressão e nas estratégias para minimizar seus impactos. Estudos como os de Oliveira e Santos (2020) evidenciam que a redução da entrada de fósforo nos corpos d’água é uma das medidas mais eficazes para conter a proliferação excessiva de algas e preservar a qualidade ambiental. Além disso, a modelagem de ecossistemas tem se mostrado uma ferramenta valiosa para simular diferentes cenários de gestão, permitindo a avaliação dos efeitos de políticas de controle sobre a qualidade da água e a biodiversidade aquática. A aplicação dessas metodologias auxilia na formulação de políticas públicas mais eficientes, promovendo a gestão sustentável dos recursos hídricos e a mitigação dos impactos da eutrofização (OLIVEIRA; SANTOS, 2020).

3.4 Sensoriamento Remoto

O progresso do sensoriamento remoto está diretamente vinculado à evolução tecnológica e à integração de dois importantes campos de pesquisa: a aerofotogrametria e a exploração espacial. Inicialmente, a captura de imagens aéreas representou a principal técnica de observação remota da superfície terrestre, permitindo o mapeamento e a análise de diferentes ambientes. No entanto, o conceito de sensoriamento remoto, tal como é compreendido atualmente, só foi formalmente introduzido na literatura científica na década de 1960, acompanhando os avanços na obtenção de dados orbitais e na ampliação das aplicações desse método para o monitoramento ambiental e a gestão de recursos naturais (WAN *et al*., 2022).

O termo sensoriamento remoto foi introduzido por Evelyn L. Pruit e sua equipe para descrever o avanço de tecnologias capazes de adquirir imagens e dados da superfície terrestre a partir de grandes distâncias, sem a necessidade de contato físico direto com o alvo observado. Essa abordagem se baseia no uso de sensores instalados em plataformas aéreas e orbitais, permitindo a coleta de informações sobre diferentes ambientes de forma sistemática e em larga escala. Com o desenvolvimento contínuo dessas tecnologias, o sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta essencial para o monitoramento ambiental, o planejamento territorial e a gestão de recursos naturais (LAN *et al*., 2024).

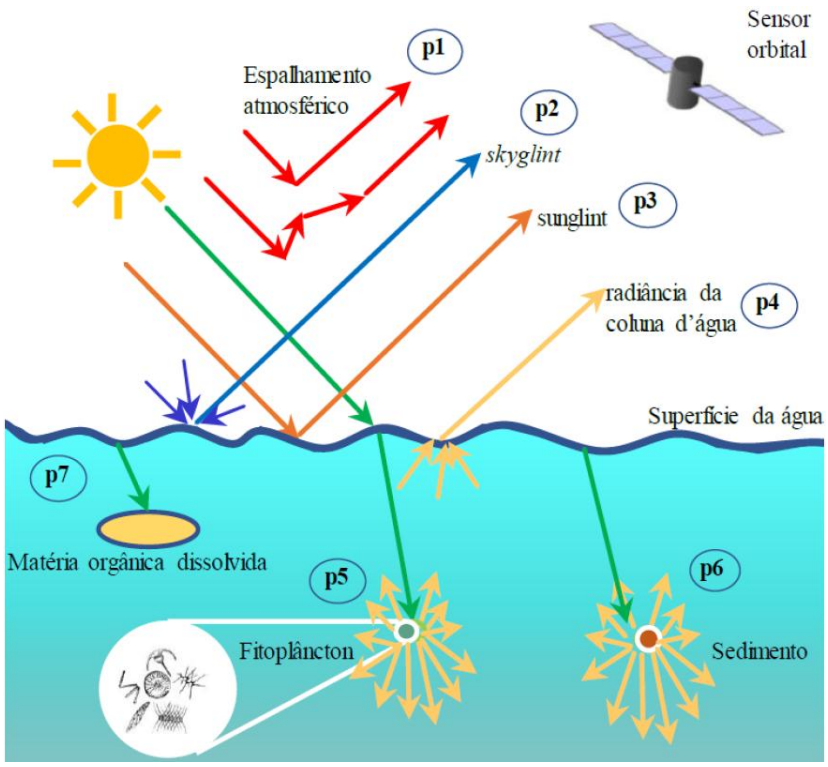
Desde a década de 1960, o sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado em estudos voltados para a gestão de recursos hídricos, impulsionado pela disponibilização de dados digitais obtidos por satélites (SUN *et al*., 2023). A evolução dessas tecnologias permitiu a aplicação de diversas metodologias que auxiliam na avaliação tanto da quantidade quanto da qualidade das águas superficiais e subterrâneas. O uso de sensores remotos possibilita a detecção de variáveis físicas, químicas e biológicas, contribuindo para o monitoramento contínuo e a análise dos corpos hídricos em escalas locais e globais. Dessa forma, o sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta essencial para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos e para a formulação de políticas públicas voltadas à conservação ambiental.

O sensoriamento remoto de ambientes aquáticos fundamenta-se nas características de interação entre a água e seus elementos com a radiação eletromagnética (luz). Em síntese, o processo ocorre através de um feixe de luz emitido que atravessa a atmosfera e alcança a superfície da água, onde parte dela é refletida pela superfície e parte penetra na água. Essa luz

interage com a coluna d'água e, ao retornar à superfície, pode ser capturada por um sensor orbital (HE; SONG, 2022).

As mudanças na tonalidade da água capturadas pelo dispositivo são influenciadas pela quantidade e composição das partículas e substâncias dissolvidas. Essas substâncias absorvem e dispersam a radiação solar direta e difusa proveniente do céu, penetrando em ambientes ópticamente complexos, como as águas interiores. A Figura 1 fornece uma visão concisa da trajetória que a luz solar percorre ao se propagar e atingir os elementos aquáticos, antes de refletir em direção ao sensor orbital, revelando os seguintes processos (BARBOSA, 2019): espalhamento atmosférico (p1), reflexão especular da luz difusa do céu (p2), reflexão especular da luz solar direta (p3), radiação emergente da coluna d'água (p4), espalhamento e absorção da luz por fitoplâncton (p5), espalhamento da luz por sedimentos (p6) e absorção da luz por matéria orgânica dissolvida (p7). Conforme mencionado pelo autor citado, é evidente na figura que a teoria de transferência radiativa constitui a estrutura matemática que conecta as propriedades ópticas inerentes (POIs) e as condições ambientais de um sistema aquático às quantidades radiométricas do campo de luz e as propriedades ópticas aparentes (POAs) do corpo d'água.

Figura 1 - Percurso da luz ao sol, e o corpo d'água ao sensor orbital.



Fonte: Barbosa (2019).

De acordo com Zhu *et al*. (2022), o sensoriamento remoto pode ser conceituado como uma disciplina voltada para o aprimoramento da aquisição de imagens da superfície terrestre, levando em consideração a distância entre os sensores e os alvos analisados. Esse processo ocorre por meio da detecção e da quantificação das respostas espectrais resultantes da interação da radiação eletromagnética com os diferentes materiais presentes na superfície terrestre. A análise dessas interações permite a obtenção de informações detalhadas sobre a composição, estrutura e dinâmica dos ambientes naturais e antrópicos, tornando o sensoriamento remoto uma ferramenta essencial para o monitoramento ambiental e o planejamento territorial.

O sensoriamento remoto possibilita a aquisição de dados e imagens da superfície terrestre por meio do registro da energia eletromagnética que é refletida ou emitida pelos diferentes elementos presentes no ambiente. Essa energia pode ter como fonte a radiação solar, no caso dos sensores passivos, ou ser gerada por sistemas artificiais, como radares, que emitem sinais e analisam seu retroespalhamento ao interagir com os alvos na superfície terrestre. A utilização dessa tecnologia permite a obtenção de informações detalhadas sobre características físico-químicas do solo, da vegetação e dos corpos hídricos, tornando-se uma ferramenta essencial para o monitoramento ambiental e a gestão sustentável dos recursos naturais (CAVENDER-BARES *et al*., 2022).

Atualmente, uma ampla variedade de sensores, tanto específicos quanto de uso geral, é empregada em pesquisas voltadas para o estudo de corpos hídricos. Contudo, a aplicação dessas tecnologias no monitoramento da qualidade da água tornou-se mais expressiva quando combinada com algoritmos bio-ópticos, que possibilitam a análise detalhada das propriedades ópticas dos ecossistemas aquáticos. Nesse contexto, sensores hiperespectrais e multiespectrais têm sido amplamente utilizados para capturar informações espectrais em diferentes faixas do espectro eletromagnético, permitindo a detecção de variáveis ambientais e aprimorando a precisão das análises sobre a qualidade da água (ORTEGA *et al*., 2019).

O uso de imagens provenientes de satélites em órbita oferece vantagens notáveis, incluindo uma ampla cobertura espacial com elevada resolução temporal, dependendo das características do satélite. Essa capacidade possibilita a monitorização regular de extensas áreas em intervalos temporais curtos. Além disso, a obtenção dessas imagens é facilitada, uma vez que são disponibilizadas gratuitamente (IBANHEZ *et al*., 2019).

Entretanto, a aplicabilidade de determinadas análises pode ser limitada por condições ambientais específicas, dificultando a obtenção de resultados consistentes para todas as imagens adquiridas. Entre os principais desafios enfrentados no sensoriamento remoto de corpos hídricos, destacam-se a interferência causada pela cobertura de nuvens e os efeitos indesejados

do reflexo solar na superfície da água. Essas restrições podem comprometer a acurácia das medições espectrais e a interpretação dos dados, exigindo abordagens metodológicas adequadas para mitigar tais impactos e garantir a confiabilidade das informações extraídas das imagens (SENT *et al*., 2021).

Conforme destacado por Bisson *et al*. (2023), os algoritmos bio-ópticos podem ser classificados de acordo com diferentes abordagens metodológicas, sendo categorizados como empíricos, semiempíricos, semi-analíticos ou analíticos. Essa diferenciação está diretamente relacionada ao tipo de parâmetro que o algoritmo busca estimar, podendo envolver tanto a quantificação de atividades biológicas quanto a determinação de propriedades ópticas dos corpos hídricos. Além disso, a metodologia empregada pode variar conforme o embasamento teórico da ferramenta utilizada, podendo basear-se exclusivamente em modelos estatísticos, na combinação de estatística com princípios físicos, em características ópticas inerentes dos materiais ou na inversão da teoria da transferência radiativa. Essa diversidade de abordagens reflete a complexidade dos processos de interação entre a luz e os constituintes da água, permitindo uma análise mais abrangente e precisa dos fenômenos bio-ópticos.

Os métodos empíricos e semiempíricos são amplamente utilizados na estimativa de parâmetros limnológicos, baseando-se em análises estatísticas de regressão entre medições realizadas diretamente nos corpos hídricos e os dados radiométricos obtidos por sensores orbitais. Essa abordagem tem como principal objetivo determinar a concentração de diferentes constituintes da água, como pigmentos fitoplanctônicos, matéria orgânica dissolvida e sedimentos em suspensão. A diferenciação entre os métodos empíricos e semiempíricos está relacionada ao grau de fundamentação física empregado em sua formulação. Enquanto os métodos empíricos selecionam bandas espectrais com base na melhor correlação estatística entre as assinaturas espectrais e os parâmetros biológicos, os semiempíricos incorporam elementos da óptica aquática para aprimorar a modelagem dos processos bio-ópticos, aumentando a precisão das estimativas (KRISHNARAJ; HONNASIDDAIAH, 2022).

No contexto da classificação óptica da água, Morel e Prieur (1977) foram os primeiros a documentar formalmente as diferenças nas propriedades ópticas dos ambientes aquáticos. Em seus estudos, os autores identificaram duas categorias principais de corpos d'água, diferenciadas com base na produtividade biológica e na turbidez. Essas classes refletem a influência da matéria dissolvida e particulada na absorção e dispersão da radiação, sendo denominadas como "Caso 1" e "Caso 2" (ZHAO *et al*., 2024).

De acordo com Zhao *et al*. (2024), as águas classificadas como "Caso 1" correspondem predominantemente às áreas oceânicas abertas, onde as variações nos sinais radiativos de saída

são controladas majoritariamente pela presença de fitoplâncton, enquanto a *Colored Dissolved Organic Matter* (CDOM) e o material detrítico estão presentes em concentrações reduzidas. Em contraste, as águas de "Caso 2", atualmente conhecidas como águas opticamente complexas, englobam regiões costeiras e interiores, onde as propriedades ópticas são influenciadas por uma combinação variável e não linear de fitoplâncton, material particulado total e CDOM. Essas características tornam as águas de "Caso 2" significativamente mais heterogêneas, exigindo abordagens diferenciadas para a interpretação espectral e o monitoramento da qualidade da água.

As águas interiores apresentam uma notável complexidade em suas propriedades ópticas, uma vez que cada corpo d'água possui condições ópticas únicas. Essa singularidade decorre de uma série de fatores, como a presença variada de sedimentos, matéria orgânica dissolvida, fitoplâncton, e outros elementos que contribuem para a absorção, dispersão e reflexão da luz (VILLALOBOS *et al.*, 2023).

Portanto, os dados provenientes dos satélites têm se tornado cada vez mais essenciais para o monitoramento ambiental. Parâmetros como clorofila, CDOM e turbidez, quando recuperados, oferecem uma valiosa base para avaliar processos e elementos cruciais em ecossistemas. Entre esses, destacam-se o transporte de sedimentos e CDOM, a produtividade total da matéria suspensa no ecossistema, o fluxo de gases do efeito estufa, as configurações de lagos e o estado trófico (KUHN *et al.*, 2019).

3.5 Sentinel-2

Os satélites da série Sentinel, desenvolvidos pela Agência Espacial Europeia (ESA), foram projetados para dar continuidade às missões de monitoramento ambiental e observação da Terra, ampliando a capacidade de coleta de dados em escala global. Esses satélites desempenham um papel fundamental no acompanhamento da dinâmica dos recursos naturais, possibilitando a análise detalhada do uso e ocupação do solo, das regiões oceânicas, das variações climáticas e da ocorrência de desastres naturais. Com sensores avançados e alta resolução espacial e temporal, a constelação Sentinel tem sido amplamente utilizada para subsidiar pesquisas científicas e ações voltadas à gestão sustentável do meio ambiente (EMBRAPA, 2020).

De acordo com Cardona-Mesa *et al*. (2024), a missão Sentinel é estruturada em satélites organizados em pares, cada um projetado para atender a uma área específica de interesse, sendo

equipados com sensores especializados conforme sua finalidade. O conjunto Sentinel-1 foi desenvolvido para o monitoramento de superfícies terrestres e oceânicas, utilizando sensores de radar para aquisição de dados independentemente das condições atmosféricas. A série Sentinel-2, por sua vez, é direcionada à observação da vegetação, dos solos e das regiões costeiras, fornecendo informações essenciais para estudos ambientais e agrícolas. Já os satélites Sentinel-3 são voltados à análise de ecossistemas marinhos, permitindo o acompanhamento de variáveis oceânicas. Além disso, as séries Sentinel-4 e Sentinel-5 têm como principal objetivo o monitoramento da qualidade do ar, possibilitando a detecção e a avaliação da concentração de gases atmosféricos e de poluentes.

Conforme a ESA (2024), a missão Sentinel-2 é composta pelos satélites gêmeos Sentinel-2A e Sentinel-2B, lançados em 2015 e 2017, respectivamente. Ambos operam na mesma órbita, mantendo uma separação angular de 180 graus, o que possibilita uma cobertura mais frequente e eficiente da superfície terrestre. Esses satélites são equipados com o sensor *MultiSpectral Imager* (MSI), um instrumento de alta resolução espectral projetado para capturar imagens em múltiplas bandas do espectro eletromagnético, permitindo aplicações voltadas ao monitoramento ambiental, à gestão do uso do solo e à análise de ecossistemas terrestres e aquáticos.

O sensor MSI, presente nos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B, destaca-se por sua ampla cobertura de imageamento, abrangendo aproximadamente 290 quilômetros de largura, aliada a uma resolução espacial que varia entre 10 e 60 metros. Além disso, a missão Sentinel-2 apresenta uma alta frequência de revisita, permitindo a obtenção de novas imagens a cada cinco dias na região equatorial, quando ambos os satélites operam em conjunto. O MSI é equipado com treze bandas espectrais que englobam as faixas do espectro visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, possibilitando a detecção de diversas variáveis ambientais. Adicionalmente, o Sentinel-2 incorpora um sistema de digitalização radiométrica em 12 bits, proporcionando maior sensibilidade na captação de variações espectrais sutis, aspecto particularmente relevante para aplicações em ambientes aquáticos, onde a radiação refletida é frequentemente baixa (HOUSKEEPER; HOOKER; CAVANAUGH, 2022).

Embora o sensor MSI tenha sido originalmente desenvolvido para o monitoramento de superfícies terrestres, sua aplicação tem se mostrado relevante para a avaliação da qualidade da água em zonas costeiras e corpos d'água interiores, tornando-se uma ferramenta valiosa para estudos limnológicos e oceanográficos. O MSI, presente nos satélites Sentinel-2, destaca-se por sua ampla capacidade radiométrica, permitindo a captura de imagens em uma ampla gama de

condições ópticas. Sua precisão abrange desde superfícies altamente refletivas, como neve e gelo, até ambientes de baixa reflectância, como águas profundas e turvas, tornando-o um sensor eficiente para a análise espectral de diferentes tipos de ambientes aquáticos (POMERLEAU *et al*., 2020).

O sensor *MultiSpectral Imager* tem se mostrado uma ferramenta altamente eficaz para o monitoramento de lagos e rios, sendo amplamente utilizado por pesquisadores devido às suas características técnicas avançadas. Entre seus principais atributos, destacam-se a resolução espacial relativamente alta, a curta frequência de revisita, que permite a obtenção contínua de dados, e seu amplo campo de visão, favorecendo a análise de extensas áreas aquáticas. Além disso, o MSI apresenta uma excelente relação sinal-ruído, proporcionando maior precisão na detecção de variações espectrais, fator essencial para o estudo da qualidade da água e de processos ambientais em ecossistemas aquáticos (WANG *et al*., 2021).

O sensor *MultiSpectral Imager* desempenha um papel fundamental na detecção e monitoramento da Clorofila-a, um dos principais pigmentos fotossintéticos do fitoplâncton, amplamente utilizado como indicador da eutrofização em mananciais. A alta sensibilidade espectral desse sensor permite a identificação e quantificação da Clorofila-a, possibilitando a análise da biomassa fitoplanctônica e o acompanhamento das variações na qualidade da água ao longo do tempo. Como a eutrofização está diretamente associada ao enriquecimento excessivo de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, a detecção desse pigmento se torna essencial para avaliar a progressão desse processo e auxiliar na gestão sustentável dos recursos hídricos. Dessa forma, o monitoramento remoto de mananciais por meio dessa tecnologia oferece uma abordagem eficiente para a identificação precoce de impactos ambientais e a implementação de estratégias de mitigação (MATTHEWS *et al*., 2023).

3.6 Clorofila-a

Dentre os diversos organismos que habitam lagos e reservatórios, destaca-se um grupo capaz de realizar a fotossíntese, convertendo a radiação solar em energia química, conhecido como fotoautotróficos. Dentro dessa categoria, o fitoplâncton assume um papel central, sendo um dos principais responsáveis pela variação da coloração da água nesses ecossistemas. A presença e a abundância desses microrganismos estão diretamente relacionadas a fatores ambientais, como disponibilidade de nutrientes, intensidade luminosa e temperatura, tornando

sua análise fundamental para o monitoramento da qualidade da água e para a identificação de processos de eutrofização (KUTYłA; KOLADA; ŁAWNICZAK-MALIńSKA, 2025).

O fitoplâncton compreende um grupo diversificado de organismos microscópicos, incluindo centenas de espécies de microalgas, caracterizadas pela presença de pigmentos fotossintéticos, sendo a Clorofila-a o mais relevante para a captação de energia luminosa (BARBOSA, 2019). Naturalmente distribuído em ecossistemas aquáticos, o fitoplâncton desempenha um papel essencial no equilíbrio ecológico e na produção primária desses ambientes. No entanto, a intensificação das atividades antrópicas pode resultar em um aumento excessivo na disponibilidade de nutrientes, favorecendo o crescimento descontrolado de cianobactérias. Esse fenômeno, conhecido como floração algal, compromete a qualidade da água ao reduzir a concentração de oxigênio dissolvido, alterar as propriedades físico-químicas do ambiente e, em alguns casos, produzir toxinas prejudiciais à fauna aquática e à saúde humana (BUMA; LEE, 2020).

Presente tanto em plantas quanto no fitoplâncton, a clorofila corresponde a um grupo de pigmentos fotossintéticos fundamentais para a conversão da energia luminosa em energia química. Esses pigmentos desempenham um papel essencial na captação da radiação solar, permitindo a realização da fotossíntese. Diferentes organismos podem apresentar distintas variações de clorofila, assim como outros tipos de pigmentos fotossintéticos, adaptando-se a diferentes condições ambientais e espectros de luz disponíveis nos ecossistemas aquáticos e terrestres (ISENSTEIN; KIMB; PARK, 2020).

A Chl-a é um parâmetro essencial para a avaliação da qualidade dos ambientes aquáticos, pois apresenta uma forte correlação com o estado trófico, a transparência da água e a biomassa fitoplanctônica presente nos corpos hídricos (MATSUSHITA *et al*., 2015). Sendo o principal bioindicador utilizado para monitorar a produtividade primária e identificar processos de eutrofização, a Chl-a pode ser estimada por meio de técnicas de sensoriamento remoto, permitindo a análise espacial e temporal das condições dos ecossistemas aquáticos de forma contínua e em larga escala (NEIL *et al*., 2019).

Altas concentrações de Chl-a são indicativas de alterações no estado trófico dos corpos hídricos, refletindo o nível de eutrofização e sua relação com a degradação da qualidade da água. O aumento excessivo desse pigmento está frequentemente associado à proliferação descontrolada de algas e cianobactérias, o que pode resultar na redução da biodiversidade aquática e no comprometimento da estabilidade ecológica. Essas mudanças afetam diretamente os serviços ecossistêmicos, alterando processos fundamentais como a ciclagem de nutrientes e

a disponibilidade de oxigênio dissolvido, impactando tanto a fauna aquática quanto os usos múltiplos da água (MATSUSHITA *et al*., 2015).

De acordo com Watanabe *et al*. (2019), a ocorrência desse fenômeno tem sido amplamente registrada em diversos ecossistemas aquáticos, despertando preocupações devido à sua relação direta com o enriquecimento excessivo de nutrientes e a consequente proliferação de algas potencialmente tóxicas. O crescimento descontrolado desses organismos pode resultar na liberação de substâncias nocivas na água, representando riscos tanto para a fauna aquática quanto para a saúde humana. Além disso, esses eventos afetam significativamente a qualidade da água e comprometem seu uso para diferentes finalidades, como abastecimento, recreação e atividades econômicas dependentes dos recursos hídricos.

Em reservatórios, o processo de eutrofização tende a se intensificar devido ao aumento das concentrações de fósforo e nitrogênio, aliado ao prolongado tempo de retenção da água. Essas condições favorecem significativamente a proliferação de cianobactérias, um grupo fitoplanctônico conhecido pelo seu potencial tóxico. A abundância desses microrganismos pode comprometer a qualidade da água, impactando ecossistemas aquáticos e representando riscos à saúde humana, especialmente quando associada à liberação de toxinas prejudiciais ao consumo e ao uso recreativo dos recursos hídricos (WATANABE *et al*., 2019).

A Chl-a apresenta uma distribuição espacial e temporal irregular, influenciada pela dinâmica da comunidade fitoplanctônica. Esse comportamento é particularmente evidente na proliferação de algas superficiais, uma vez que as concentrações de Chl-a podem se deslocar verticalmente ao longo da coluna d'água em resposta a fatores ambientais, como radiação solar, disponibilidade de nutrientes e condições hidrodinâmicas. Essas variações resultam em padrões heterogêneos de distribuição, podendo ocorrer em escalas temporais curtas, desenvolvendo-se em poucas horas ou dias, o que torna seu monitoramento um desafio para a gestão da qualidade da água (BUMA; LEE, 2020).

A compreensão da distribuição espacial da Clorofila-a é essencial para a definição de estratégias eficazes de manejo, permitindo a recuperação das funções ecológicas e dos serviços prestados pelos ecossistemas aquáticos. Nesse contexto, o monitoramento contínuo torna-se uma ferramenta indispensável para a análise das variações temporais e espaciais desse pigmento fotossintético, possibilitando a identificação precoce de processos de eutrofização e a implementação de medidas de controle adequadas para a preservação da qualidade da água (ESTOQUE *et al*., 2022).

Nesse cenário, a aplicação do sensoriamento remoto para a quantificação e o mapeamento das concentrações de Chl-a em águas produtivas e turvas tem se mostrado uma

abordagem eficaz para a compreensão dos ciclos globais de nutrientes. A utilização de sensores orbitais permite a obtenção de dados em larga escala, possibilitando a análise espacial e temporal das variações na biomassa fitoplanctônica, o que contribui significativamente para o monitoramento da qualidade da água e a gestão sustentável dos ecossistemas aquáticos (LINS *et al*., 2019).

A Clorofila-a, assim como outros pigmentos fotossintéticos, absorve seletivamente a radiação eletromagnética, resultando em um espectro de absorção caracterizado por distintos picos. Esse pigmento apresenta um pico de reflectância bem definido na faixa do verde (550 nanômetros), além de uma elevada reflectância na região do infravermelho próximo, próxima a 700 nanômetros. Adicionalmente, a Chl-a exibe uma forte absorção nas faixas do azul (450–475 nanômetros) e do vermelho (670 nanômetros), devido ao espalhamento da luz nesses comprimentos de onda. Essas propriedades ópticas são fundamentais para a detecção remota da Chl-a, permitindo a análise de sua distribuição em ambientes aquáticos por meio do sensoriamento remoto (FALCIONI *et al.*, 2022).

O conhecimento sobre o comportamento espectral da Clorofila-a tem sido amplamente empregado em pesquisas voltadas para a sua quantificação, tornando-se uma abordagem essencial no monitoramento da qualidade da água. Uma das estratégias utilizadas para estimar suas concentrações baseia-se na análise das bandas espectrais e nas relações entre diferentes comprimentos de onda, permitindo a detecção remota desse pigmento em ecossistemas aquáticos. Essa metodologia possibilita a obtenção de dados em larga escala, contribuindo para a avaliação da produtividade primária e para a identificação de processos de eutrofização em corpos hídricos (PRASANTH; SIVAKUMAR; RAMARAJ, 2022).

A estimativa da concentração de Clorofila-a pode ser realizada por meio da análise da razão entre diferentes bandas espectrais, uma abordagem amplamente utilizada em estudos de monitoramento da qualidade da água. Duas relações espectrais são comumente aplicadas para esse fim: a razão azul-verde, que se mostra mais eficiente na estimativa de Chl-a em oceanos abertos, onde a influência de matéria orgânica dissolvida é reduzida, e a razão entre o infravermelho próximo (NIR) e o vermelho, amplamente empregada em águas turvas e com elevados teores de CDOM. Essas relações espectrais permitem uma avaliação mais precisa da distribuição da Chl-a, auxiliando na caracterização dos processos ecológicos e na detecção de eventos de eutrofização (POMERLEAU *et al*., 2020).

De acordo com Novo (2019), o aumento da concentração de Chl-a em ambientes eutrofizados, particularmente aqueles com intensa floração algal na superfície, está diretamente relacionado a um incremento na reflectância na faixa do infravermelho próximo (NIR) e a um

aumento da absorção na região do vermelho. Diante desse comportamento espectral, a razão entre essas bandas se mostra uma abordagem eficiente para a estimativa da Chl-a, permitindo a identificação de áreas tróficas em sistemas aquáticos continentais com baixa turbidez causada por partículas inorgânicas. Essa metodologia contribui para o monitoramento da qualidade da água, auxiliando na detecção precoce de processos de eutrofização e na gestão sustentável dos recursos hídricos.

Lins *et al*. (2019) destacam a importância da construção de modelos específicos que considerem as particularidades ópticas de cada ambiente aquático. Devido às variações nas propriedades espectrais dos corpos d'água, é improvável que uma abordagem única seja eficaz para todas as superfícies hídricas. Nesse sentido, o desenvolvimento de algoritmos adaptativos surge como uma alternativa promissora, permitindo a calibração dos modelos de estimativa de Clorofila-a e outros parâmetros ambientais de acordo com as características locais. Essa abordagem contribui para aprimorar a precisão das análises e otimizar a aplicação do sensoriamento remoto no monitoramento da qualidade da água.

4. REVISÃO SISTEMÁTCA

4.1 Análise Bibliométrica

Os principais resultados dos 42 artigos selecionados, foram extraídos das bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, evidenciando a relevância do tema e seu estado da arte. Os dados revelam uma ampla variedade de aplicações e intervenções para mitigar o processo de eutrofização em diferentes contextos e nacionalidades, demonstrando a diversidade de abordagens adotadas para enfrentar essa condição ambiental.

Diversos estudos científicos corroboram a eficácia do Sentinel-2 nesse tipo de aplicação. Abbas e Alameddin (2023), por exemplo, utilizaram o satélite em conjunto com modelos de aprendizado de máquina para estimar com precisão as concentrações de clorofila-a em reservatórios do Mediterrâneo. Outros pesquisadores, como Bhattacharjee *et al*. (2022), empregaram o Sentinel-2 para mapear florações de algas em grandes rios, demonstrando a capacidade da tecnologia em identificar eventos de eutrofização em diferentes contextos ambientais.

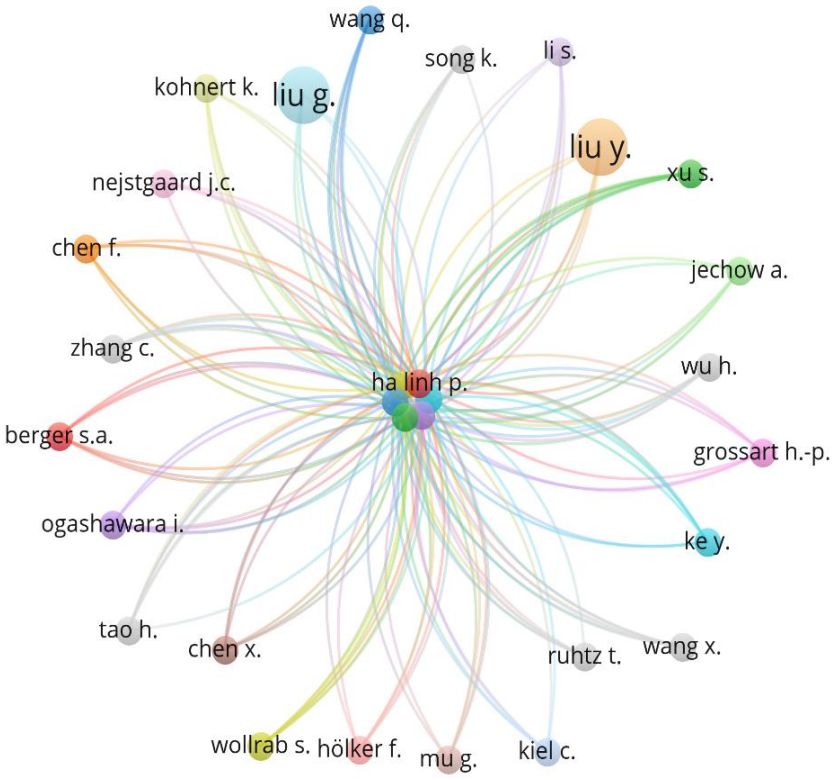
Souza *et al*. (2021), investigaram o uso de sensoriamento remoto na avaliação dos danos ambientais causados pelo rompimento da barragem de Brumadinho, em Minas Gerais, em 2019. Utilizando imagens de satélite (Landsat-8 e Sentinel-2), os pesquisadores analisaram as mudanças na cobertura do solo e na qualidade da água, encontrando uma redução de 69% na área florestal e um aumento de 70% na turbidez da água. Os resultados destacam a eficácia do sensoriamento remoto como ferramenta para monitorar a eutrofização e suas implicações ambientais, oferecendo uma abordagem prática para intervenções rápidas e informadas em políticas de gestão ambiental e mitigação de desastres. Essa metodologia pode ser replicada em outros contextos, contribuindo para a compreensão e resposta a futuros eventos semelhantes.

Além disso, o estudo de Pereira *et al.* (2022) explora a aplicação do satélite Sentinel-2 para monitorar a eutrofização no Rio Poti, em Teresina, Piauí, Brasil. Utilizando índices bio-ópticos, como o *Difference Normalized Chlorophyll Index* (NDCI) para clorofila-a e o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para aguapés, os autores empregaram sensoriamento remoto para mapear e acompanhar a proliferação de plantas aquáticas. Os resultados mostraram uma variação espaço-temporal da eutrofização, com o NDCI superando outros índices em precisão para detecção de clorofila-a. No final do período seco, a área coberta por aguapés atingiu 570.145,6 m², demonstrando a adequação do *Multispectral Instrument Sensor* (MSI) para monitoramento ambiental (PEREIRA *et al*., 2022).

Adicionalmente, estudos internacionais, como os realizados no Lago Chagan, China (Shi *et al*., 2022), Lago Pamvotis, Grécia (Peppa *et al*., 2020), e estuário do Rio da Prata, América do Sul (Maciel *et al*., 2023), consolidaram o Sentinel-2 como ferramenta de monitoramento sazonal e de alerta precoce. A identificação de zonas críticas e de padrões espaciais e temporais, como observado nos lagos Andinos do Equador (Izurieta *et al*., 2023) e nas enseadas do Mar de Azov (Krivoguz *et al*., 2023), evidencia a capacidade do satélite para avaliar a saúde de ecossistemas aquáticos e fornecer subsídios essenciais para intervenções de mitigação. Assim, o Sentinel-2 destaca-se não apenas como recurso científico, mas como ferramenta prática de apoio ao monitoramento contínuo e ao desenvolvimento de políticas ambientais fundamentadas.

Dessa forma, as Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, os resultados das citações nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* geradas através das pesquisas.

Figura 2 - Citações entre autores relacionados à eutrofização e o satélite Sentinel-2 na base *Scopus* e *Web of Science*.



Fonte: Autor (2024).

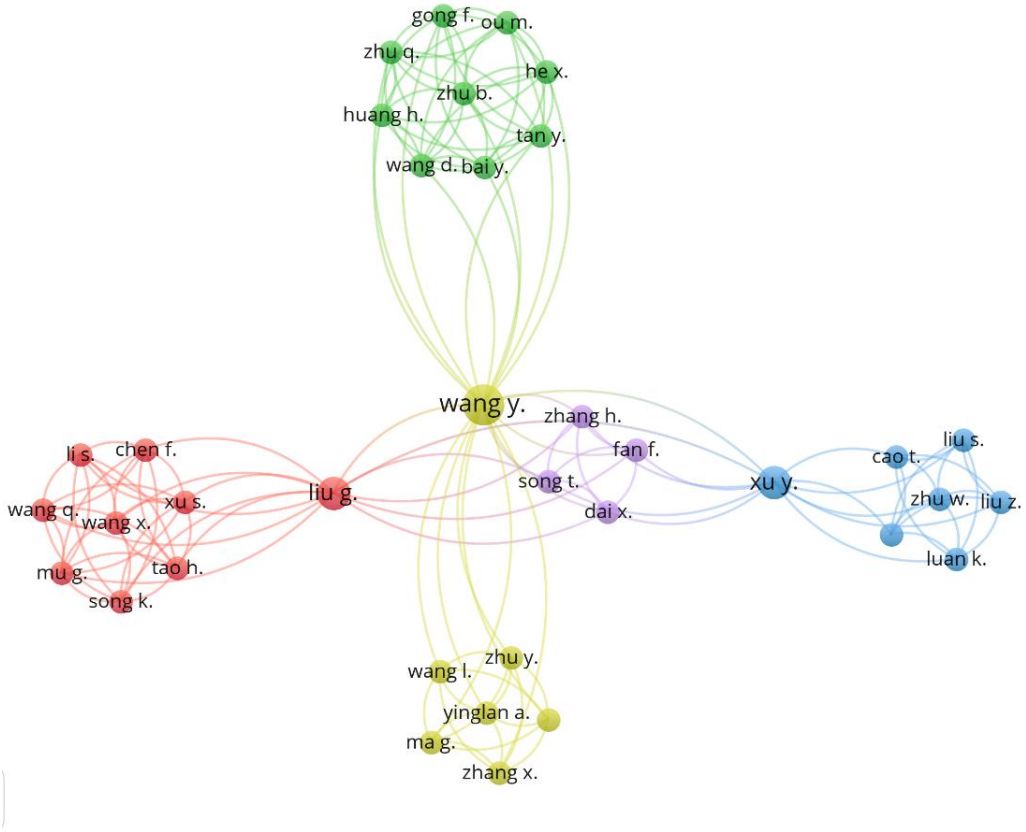
Karimi *et al*. (2024) afirmam que o uso do Sentinel-2 no monitoramento da eutrofização apresenta alta precisão, especialmente para estimar a concentração de clorofila-a, um indicador essencial da biomassa fitoplanctônica. Conforme Maciel *et al*., (2023), o índice espectral NDCI (*Normalized Difference Chlorophyll Index*) foi amplamente aplicado e comprovou-se eficaz para mapear as variações espaço-temporais da qualidade da água, revelando áreas fortemente afetadas pela proliferação de algas e cianobactérias.

Os principais resultados relacionados ao uso do Sentinel-2 no artigo de Jang *et al*. (2024) destacam o desenvolvimento de um modelo de regressão linear múltipla (MLR) para estimar a concentração de clorofila-a em um reservatório de pequeno porte, considerando condições de qualidade da água complexas.

Conforme demonstrado no estudo de Izurieta *et al*. (2023), o Sentinel-2 destacou-se como uma ferramenta indispensável para o monitoramento ambiental devido à sua alta resolução espacial e frequência temporal, permitindo capturar mudanças significativas na qualidade da água de lagos andinos com diferentes estados tróficos. De maneira complementar, Jang *et al*. (2024) evidenciaram a utilidade do Sentinel-2 no monitoramento de reservatórios de pequeno porte, validando sua aplicação para estimativas precisas de Chl-a em ambientes aquáticos complexos. Esses resultados reforçam o papel do Sentinel-2 como uma base confiável para decisões de gestão e mitigação dos impactos da eutrofização.

Os dados exportados pelo *software Vosviewer*, demostram a rede de coautores, conforme Figura 4. A imagem demonstra a relação entre os coautores e suas respectivas pesquisas. A rede apresenta uma relação próximas entre os pesquisadores, demonstrando assim uma alta interação entre a temática e os pesquisadores.

Figura 3 - Coautores relacionados com à eutrofização e o satélite Sentinel-2 pelas bases de dados.



Fonte: Autor (2024).

Segundo Sodhi, Dahiphale e Arora (2024), a alta resolução espacial e temporal do Sentinel-2, associada à padronização das metodologias, demonstra o potencial do sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental. Os resultados obtidos nestes estudos evidenciam a importância do Sentinel-2 como ferramenta essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos, auxiliando na identificação precoce de áreas em risco e na implementação de medidas de controle e recuperação (CUI *et al*., 2021).

A figura 4 apresenta colaboração entre os países na construção do entendimento da temática de maneira global.

Figura 4 - Publicações relacionadas à eutrofização e o satélite Sentinel-2 por países segundo as bases de dados de coautoria.

Fonte: Autor (2024).

A pesquisa de Zhao *et al*. (2024), revela uma sinergia global na pesquisa sobre eutrofização utilizando dados do Sentinel-2. A colaboração entre países como Espanha (possuindo 4 documentos de coautoria relacionado), Reino Unido (possuindo 2 documentos de coautoria relacionado), Estados Unidos (possuindo 2 documentos de coautoria relacionado) e Coreia do Sul (possuindo 2 documentos de coautoria relacionado) tem sido extremamente relevante para o avanço metodológico nesse campo. A troca de conhecimentos e a validação cruzada de algoritmos em diferentes contextos geográficos e climáticos têm impulsionado a confiabilidade e a aplicabilidade das técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento da qualidade da água.

A interação entre pesquisadores de diversas nacionalidades tem resultado em refinamentos significativos nos índices espectrais, como o NDCI e o MPH, permitindo uma quantificação mais precisa da clorofila-a e uma delimitação mais eficiente das áreas afetadas por eutrofização. Conforme demonstrado por Pereira *et al.* (2022), o índice NDCI, aplicado a dados do Sentinel-2, apresentou o melhor desempenho para estimar concentrações de clorofila-a em águas interiores, como no rio Poti, no Brasil. Essa colaboração transnacional tem sido crucial para o desenvolvimento de ferramentas robustas e eficientes de monitoramento ambiental, que podem ser aplicadas em diferentes escalas geográficas, permitindo uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

5. METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo visa à determinação do Índice de Estado Trófico (IET), por meio da concentração de Clorofila-a no reservatório de Mateus Vieira, em Taquaritinga do Norte-PE, a partir da utilização de imagens do Sentinel-2, com a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e índices espectrais.

O levantamento e o processamento das imagens do satélite Sentinel-2 foram realizados por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Para assegurar a qualidade dos dados, aplicaram-se critérios específicos de filtragem, considerando tanto aspectos temporais quanto espaciais. O recorte espacial foi delimitado com base na área do reservatório de Mateus Vieira, enquanto a seleção temporal das imagens abrangeu o período de 2015 a 2025. Adicionalmente, com o objetivo de minimizar interferências atmosféricas e aprimorar a precisão da análise espectral, foram incluídas apenas imagens com cobertura de nuvens inferior a 10%.

O cálculo do *Normalized Differential Index of Chlorophyll-a* (NDCI) médio foi realizado para a área do reservatório ao longo da série histórica de imagens do Sentinel-2. A partir dessa série temporal, foram identificadas datas-chave associadas a picos e vales nos valores do NDCI, representando variações significativas na concentração de biomassa fitoplanctônica. Para cada uma dessas datas, procedeu-se à delimitação do espelho d'água por meio do *Normalized Difference Water Index* (NDWI), assegurando que as análises fossem restritas à área efetivamente ocupada pelo reservatório.

Em sequência, realizou-se o mapeamento do estado trófico do reservatório com base nos índices espectrais NDCI (*Normalized Differential Index of Chlorophyll-a*) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), permitindo a identificação de padrões relacionados à qualidade da água. Por fim, os valores de NDCI foram reclassificados para estimar a concentração de Clorofila-a e o IET, utilizando como referência o modelo AlgaeMAp (LOBO *et al*., 2023) e dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

5.1 Área de Estudo

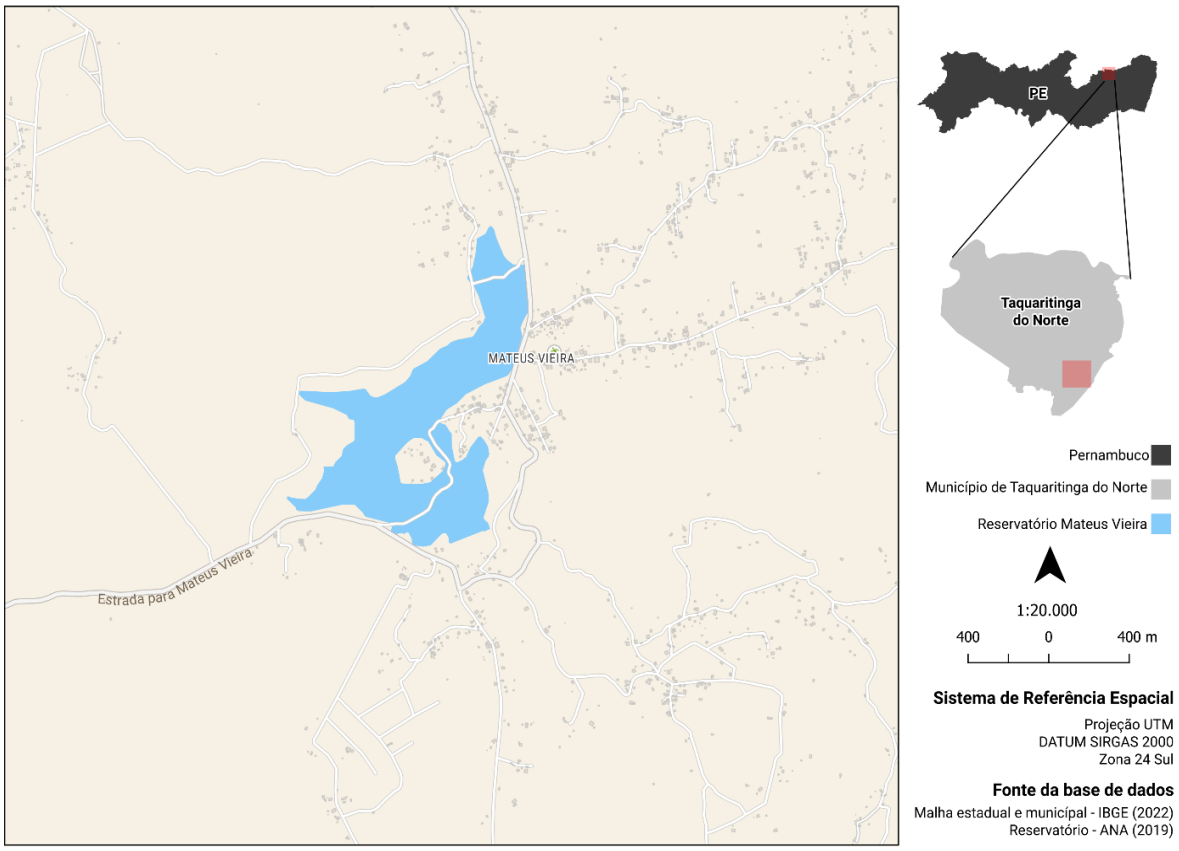
A área de estudo está situada no município de Taquaritinga do Norte, no estado de Pernambuco, abrangendo o Reservatório de Mateus Vieira. Esse reservatório está inserido na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, um dos principais sistemas hídricos do estado. A Bacia Hidrográfica possui uma extensão total de 280 quilômetros, percorrendo um trajeto na direção

Sudoeste-Nordeste até desaguar no oceano Atlântico, na cidade do Recife, capital pernambucana. Esse sistema hidrográfico desempenha um papel fundamental no abastecimento hídrico e na manutenção dos ecossistemas locais, sendo de grande relevância para estudos ambientais e de qualidade da água (APAC, 2024).

O Reservatório de Mateus Vieira desempenha um papel fundamental no abastecimento hídrico da região, atendendo predominantemente o município de Taquaritinga do Norte, além das localidades de Riachos da Goiabeira, Barriguda, Topada, Pitombas e Capela Nova. A vazão média de captação destinada ao fornecimento de água para essas áreas é de aproximadamente 30 litros por segundo, sendo o reservatório operado a uma cota de 547,99 metros. Atualmente, seu volume armazenado é de 1,54 hectômetro cúbico (hm^3), enquanto sua capacidade total de armazenamento é de 2,75 hm^3 (ANA, 2024). Dentre as localidades atendidas, Taquaritinga do Norte representa o maior centro urbano, contando com uma população de 24.736 habitantes, conforme os dados do Censo Demográfico de 2022, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A Figura 5 apresenta o mapa de localização do Reservatório de Mateus Vieira, destacando a área de estudo submetida ao processo de monitoramento utilizando imagens do satélite Sentinel-2. Esse monitoramento possibilita a obtenção de dados espectrais para a análise da qualidade da água, permitindo a identificação de padrões espaciais e temporais relacionados à concentração de Clorofila-a.

Figura 5 - Mapa de localização do Reservatório Mateus Vieira.



Fonte: Autor (2025).

O Reservatório de Mateus Vieira está inserido em uma região caracterizada por um cenário econômico diversificado, abrangendo setores como indústria, agricultura, pecuária e turismo (IBGE, 2021). Dentre essas atividades, destaca-se a produção de café, que confere ao município o reconhecimento como a capital do café no estado de Pernambuco. O território municipal possui uma extensão de aproximadamente 475 km², com uma distribuição populacional predominantemente urbana, onde 72% dos habitantes residem em áreas urbanizadas, enquanto 28% da população encontra-se na zona rural, evidenciando a importância das atividades agropecuárias para a economia local.

O Reservatório de Mateus Vieira recebe contribuição hídrica de diversos cursos d'água, tendo como principal efluente o Rio Capibaribe, além dos riachos Tapera, do Grude, Doce, da Cruz, Capim, Topada, Grota Funda, do Mulungu, Mingaiú e Estreito (PERNAMBUCO, 2024). O Rio Capibaribe, por sua vez, possui uma extensão de 240 quilômetros, tendo sua nascente localizada na Serra do Jacarará, no município de Poção, Pernambuco, e seguindo seu curso até

a foz no Oceano Atlântico, na cidade de Recife, desempenhando um papel essencial no abastecimento hídrico e na dinâmica ambiental da região (IBGE, 2021).

O município está situado no Planalto da Borborema, uma região caracterizada por formações geológicas compostas por solos maciços e outeiros, com altitudes que variam entre 650 e 1.000 metros. Essas condições geográficas influenciam diretamente o clima local, que é classificado como tropical chuvoso com verão seco. O período de chuvas ocorre predominantemente entre janeiro e setembro, com temperaturas médias em torno de 20°C. Durante o outono e inverno, há uma variação térmica mais acentuada, com médias em torno de 25°C, podendo, em casos excepcionais, atingir mínimas de 10°C (PERNAMBUCO, 2024).

5.2 Levantamento e Processamento dos Dados

5.2.1 *Google Earth Engine* (GEE)

Este estudo utilizou imagens do satélite Sentinel-2, equipado com o sensor *Multispectral Instrument* (MSI), para o cálculo de índices espectrais e a subsequente determinação do estado trófico do reservatório. A aquisição e o processamento das imagens foram realizados por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), que possibilitou a manipulação eficiente dos dados orbitais para a análise da qualidade da água (NASCIMENTO *et al*., 2024).

Segundo Bueno *et al*. (2023), o *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma de computação em nuvem desenvolvida para a análise e o processamento de grandes volumes de dados geoespaciais, com ampla aplicação em sensoriamento remoto. A plataforma disponibiliza um extenso repositório de imagens de satélite e produtos derivados, além de oferecer ferramentas avançadas para a implementação de algoritmos geoespaciais, facilitando a extração e a análise de informações ambientais de forma eficiente e escalável.

As imagens de satélite utilizadas neste estudo foram acessadas e processadas a partir do *dataset Harmonized* Sentinel-2 MSI Level-2A, disponibilizado diretamente na plataforma *Google Earth Engine* (GEE). A escolha desse conjunto de dados deve-se ao fato de as imagens já apresentarem correções atmosféricas pré-aplicadas, o que contribui para a melhoria da acurácia e da confiabilidade dos dados, tornando-os mais adequados para análises espectrais (BUENO *et al*. 2023).

Com o objetivo de assegurar a qualidade das imagens utilizadas, foram aplicados filtros relacionados à data, localização e cobertura de nuvens. Inicialmente, realizou-se a seleção das imagens da coleção Sentinel-2 MSI, abrangendo o período de 31 de janeiro de 2015 a 1º de

fevereiro de 2025, correspondente a um intervalo de dez anos. Contudo, considerando que a aquisição regular de imagens do Sentinel-2 teve início em 2018, a série histórica efetivamente analisada foi delimitada ao período de 2018 a 2025.

5.2.2 Datas de Estudo

Para a construção dos mapas temáticos, foram definidas datas-chave com base na análise da série histórica do *Normalized Differential Index of Chlorophyll-a* (NDCI). O critério de seleção consistiu na escolha de uma imagem representativa para cada ano do período analisado, priorizando aquelas com a menor cobertura de nuvens, a fim de minimizar interferências atmosféricas que pudessem comprometer a qualidade dos dados espectrais. Além disso, foram considerados os picos e os vales dos valores de NDCI, de modo a abranger tanto os períodos de maior, quanto de menor concentração de biomassa fitoplanctônica. Essa abordagem permitiu capturar a amplitude da variabilidade espectral ao longo do tempo, assegurando uma representação mais fiel das condições ambientais do reservatório em diferentes contextos sazonais e hidrológicos (NASCIMENTO *et al*., 2024).

Com base nos critérios definidos para a seleção das imagens, foram escolhidas 14 datas representativas da série histórica analisada, conforme Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Quadro de datas selecionadas mediante os critérios metodológicos.

Sequência	**Datas Selecionadas**
01	27 de dezembro de 2018
02	17 de julho de 2019
03	17 de março de 2019
04	15 de fevereiro de 2020
05	21 de junho de 2020
06	17 de maio de 2021
07	21 de novembro de 2021
08	20 de agosto de 2022
09	14 de julho de 2023
10	02 de outubro de 2023
11	12 de agosto de 2024
12	30 de novembro de 2024
13	24 de janeiro de 2025
14	19 de abril de 2025

Fonte: Autor (2025).

A seleção dessas datas considerou fatores como a menor cobertura de nuvens e a representatividade dos extremos da variação dos valores do *Normalized Differential Index of Chlorophyll-a* (NDCI), visando capturar tanto os períodos de maior quanto de menor concentração de material orgânico em suspensão. Essa abordagem permitiu uma análise mais abrangente das condições ambientais do reservatório ao longo do tempo. Ressalta-se que todos os anos iniciando de 2018 forma contemplado pelo menos com uma data analisada, devido à ausência de cenas com cobertura de nuvens inferior aos limites estabelecidos, o que comprometeria a qualidade e a precisão dos resultados espectrais.

5.2.3 Análise da Série Histórica do NDCI

Após a aplicação dos critérios de filtragem das imagens, considerando parâmetros temporais e de cobertura de nuvens, foi realizada a extração e o cálculo do NDCI. O cálculo do NDCI utilizou bandas espectrais específicas do sensor MSI (*Multispectral Instrument*) do Sentinel-2, visando estimar a concentração de Clorofila-a, um importante indicador da biomassa algal e da qualidade da água (SILVA *et al*., 2023).

Os valores obtidos do NDCI foram organizados em uma série temporal, abrangendo 40 datas selecionadas entre 2018 e 2025, todas atendendo aos critérios estabelecidos de menor cobertura de nuvens e relevância para a análise espectral. Para fins de demonstração dos resultados, foram escolhidas sete datas representativas, uma para cada ano do período analisado. As datas selecionadas foram: 27 de dezembro de 2018, 17 de julho de 2019, 17 de março de 2019, 15 de fevereiro de 2020, 21 de junho de 2020, 17 de maio de 2021, 21 de novembro de 2021, 20 de agosto de 2022, 14 de julho de 2023, 02 de outubro de 2023, 12 de agosto de 2024, 30 de novembro de 2024, 24 de janeiro de 2025 e 19 de abril de 2025. Essa abordagem permitiu identificar padrões sazonais, tendências temporais e variações significativas na concentração de Clorofila-a associadas a diferentes condições ambientais e hidrológicas do reservatório.

5.2.4 Delimitação do Espelho d'água

A delimitação do espelho d'água do reservatório para cada uma das datas selecionadas foi realizada por meio do cálculo do *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Esse índice é amplamente utilizado em estudos de sensoriamento remoto para a identificação de corpos hídricos, permitindo diferenciar de forma eficiente áreas cobertas por água em relação à

vegetação e ao solo exposto. O NDWI é calculado com base na combinação de bandas espectrais do visível e do infravermelho próximo, explorando a alta refletância da água no espectro visível e sua baixa refletância no infravermelho, o que contribui para uma melhor detecção de áreas alagadas (AVIZ, 2021).

O processamento das imagens para o cálculo do NDWI foi realizado considerando as especificidades da área de estudo, com o objetivo de garantir uma representação precisa da lâmina d'água em cada período analisado. O índice foi aplicado em todas as imagens selecionadas, resultando em máscaras de classificação binária que permitiram isolar o espelho d'água das demais classes de cobertura, como vegetação ripária e solos úmidos. Esse procedimento foi fundamental para assegurar que as análises espectrais subsequentes, como o cálculo do NDCI, fossem realizadas exclusivamente sobre a área efetivamente ocupada pela lâmina d'água, aumentando a acurácia dos resultados obtidos (AVIZ, 2021).

Essa etapa foi de fundamental importância para garantir a precisão das análises espectrais subsequentes, uma vez que possibilitou a delimitação do espelho d'água, minimizando a influência de interferências externas, como áreas de vegetação adjacente e superfícies úmidas que não possuem relação direta com o corpo hídrico em estudo. Essa abordagem metodológica assegurou que o cálculo dos índices espectrais, como o NDCI, fosse realizado exclusivamente sobre pixels representativos da superfície da água, aumentando, assim, a confiabilidade e a consistência dos resultados obtidos na avaliação da qualidade ambiental do reservatório.

O *Normalized Difference Water Index* (NDWI) é obtido a partir da combinação das bandas do verde (B3: 560 nm) e do infravermelho próximo (B8: 842 nm) das imagens do satélite Sentinel-2, sendo calculado de acordo com a Equação 1:

$$\mathrm{NDWI} = (\mathrm{B03} - \mathrm{B08})/(\mathrm{B03} + \mathrm{B08}) \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Os valores do NDWI variam em uma escala que compreende o intervalo de -1 a 1. Valores positivos estão associados à presença de corpos hídricos, uma vez que a água possui alta capacidade de absorção no infravermelho próximo e maior refletância na faixa do verde, resultando em índices mais elevados. Por outro lado, valores negativos indicam a predominância de superfícies não aquáticas, como áreas de solo exposto, vegetação densa ou superfícies urbanizadas, devido às suas características espectrais distintas, que refletem mais no infravermelho próximo do que no espectro do verde (JULIEN; NARRON; MISHRA, 2025).

Ainda conforme o autor, para a segmentação da máscara que delimita o espelho d'água, foi adotado um limiar estabelecido de forma empírica, com base na análise de diferentes imagens e em testes preliminares que permitiram identificar o valor mais adequado para o contexto da área de estudo. Após a realização desses testes, definiu-se que pixels com valores de NDWI superiores a -0,25 seriam considerados representativos da lâmina d'água. Esse valor de corte mostrou-se eficiente para diferenciar de forma satisfatória as áreas aquáticas das não aquáticas, contribuindo para a acurácia da delimitação do espelho d'água e para a confiabilidade das análises espectrais subsequentes.

Após a geração da máscara de classificação, foram mantidos exclusivamente os pixels correspondentes a áreas de água, identificados com base nos valores do *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Essa etapa foi fundamental para garantir que as análises subsequentes se restringissem à área efetivamente ocupada pelo espelho d'água do reservatório, eliminando interferências de superfícies não aquáticas. Em seguida, foram calculados o Índice de Diferença Normalizada de Clorofila (NDCI) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), assegurando maior precisão na avaliação das condições ambientais e na análise da qualidade da água.

5.2 Determinação do Índice do Estado Trófico (IET)

Conforme destacado por Tao e Yu (2024), o *Normalized Differential Index of Chlorophyll-a* (NDCI) foi o principal parâmetro adotado para a avaliação do estado trófico do reservatório, em razão de sua sensibilidade à variação na concentração de clorofila-a, refletindo diretamente a biomassa fitoplanctônica presente na coluna d'água. No entanto, para complementar a análise e identificar a possível presença de macrófitas aquáticas, foi aplicado o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que apresenta alta sensibilidade à refletância da vegetação, especialmente em áreas com cobertura de plantas aquáticas flutuantes ou submersas. O NDVI é calculado com base na relação entre as bandas do vermelho (B4: 665 nm) e do infravermelho próximo (B8: 842 nm), explorando a diferença de resposta espectral entre a alta absorção da luz vermelha pela clorofila e a forte refletância no infravermelho próximo, característica da vegetação saudável. O cálculo do índice foi realizado de acordo com a Equação 2:

$$\mathrm{NDVI} = (\mathrm{B08} - \mathrm{B04}) / (\mathrm{B08} + \mathrm{B04}) \qquad \text{(Eq. 2)}$$

O cálculo do *Normalized Differential Index of Chlorophyll-a* (NDCI) foi realizado utilizando as bandas espectrais do sensor Sentinel-2, de acordo com sua formulação padrão. Esse índice é amplamente aplicado no monitoramento da qualidade da água, devido à sua capacidade de detectar variações na concentração de clorofila-a, que atua como um indicador-chave da biomassa fitoplanctônica. A utilização das bandas do vermelho (B04) e da borda do vermelho (B05) é fundamental para essa análise, pois essas faixas do espectro eletromagnético apresentam alta sensibilidade às alterações na composição da matéria orgânica presente em ambientes aquáticos, favorecendo uma avaliação mais precisa do estado trófico do reservatório (SALLS *et al*., 2024).

A Equação 3 é adotada para o cálculo do NDCI:

$$\mathrm{NDCI} = (\mathrm{B05} - \mathrm{B04}) / (\mathrm{B05} + \mathrm{B04}) \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Segundo Salls *et al*. (2024), nesse cálculo, B05 refere-se à banda da borda do vermelho, com comprimento de onda em 705 nm, enquanto B04 corresponde à banda do vermelho, situada em 665 nm. A relação entre essas bandas permite evidenciar contrastes espectrais associados à presença de clorofila-a, facilitando a identificação de áreas com maior produtividade biológica. Esse método contribui de forma significativa para a análise da qualidade da água, permitindo o acompanhamento de alterações espaciais e temporais nos corpos hídricos, essenciais para a gestão ambiental e o planejamento de ações de conservação.

A conversão dos valores do NDCI em concentrações de clorofila-a (Chl-a) foi realizada por meio da aplicação do modelo AlgaeMAp, desenvolvido por Lobo *et al*. (2023). Esse modelo foi especificamente concebido para estimar a biomassa fitoplanctônica em ambientes aquáticos, como reservatórios e lagos, considerando as particularidades espectrais desses ecossistemas. O AlgaeMAp apresenta a vantagem de ter sido previamente calibrado com dados empíricos de diferentes corpos hídricos, o que confere maior robustez e acurácia aos resultados obtidos, superando a abordagem tradicional baseada em coeficientes fixos da literatura, que podem não refletir adequadamente as condições locais.

Após a estimativa das concentrações de clorofila-a, os valores resultantes foram comparados com os limiares estabelecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a categorização do Índice de Estado Trófico (IET). Esse procedimento permitiu classificar o estado trófico do reservatório de forma mais precisa, considerando as faixas de referência específicas para diferentes níveis de eutrofização. A reclassificação dos dados foi realizada de acordo com as categorias definidas pelo AlgaeMAp, que são descritas

detalhadamente na Tabela 1, assegurando a consistência metodológica e a comparabilidade dos resultados com estudos similares voltados ao monitoramento da qualidade da água.

Tabela 2 - Reclassificação do Índice do Estado Trófico (IET).

Categoria (Estado Trófico)	**NDCI (AlgaeMap)**	**Chl-a (AlgaeMap)**	**Chl-a (CETESB)**
Oligotrófico	< -0,14	< 8	< 3,24
Mesotrófico	-0,14 a -0,07	8 a 14	3,24 a 11,03
Eutrófico	-0,07 a 0,03	14 a 30	11,03 a 30,55
Supereutrófico	0,03 a 0,15	30 a 70	30,55 a 69,05
Hipereutrófico	> 0,15	> 70	> 69,05

Fonte: Lobo *et al*. (2021).

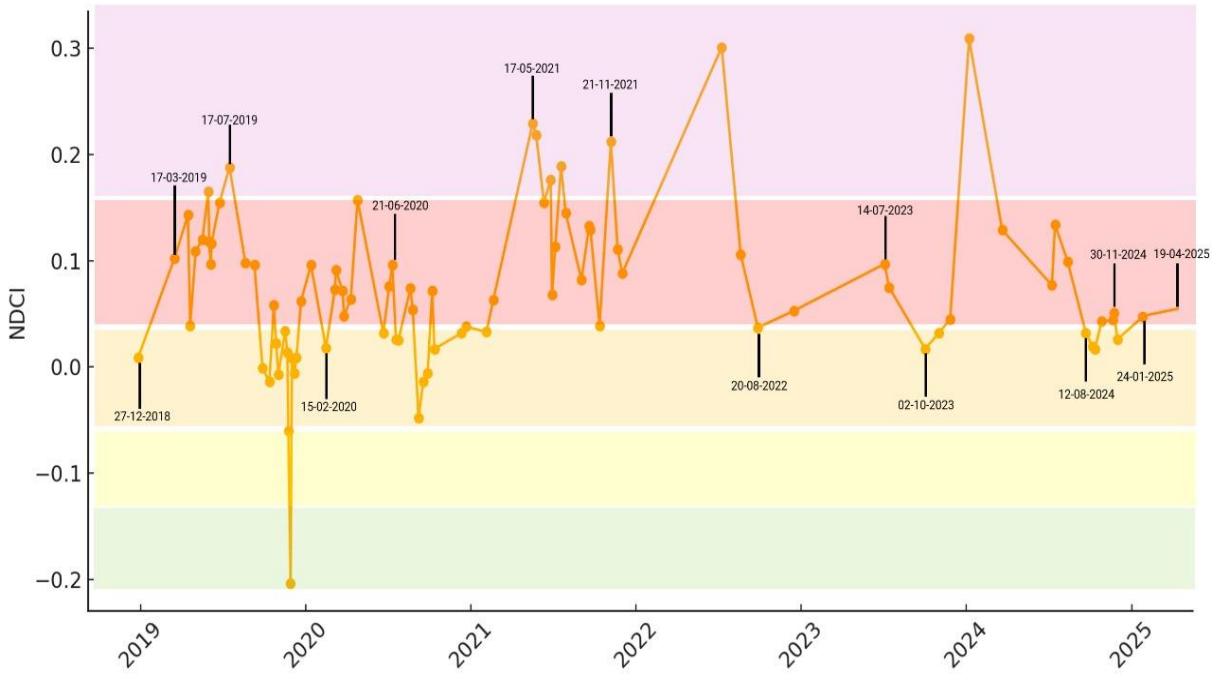
O processo de categorização do estado trófico de corpos d'água com base na tabela apresentada inicia-se com o cálculo do *Normalized Differential Index of Chlorophyll-a* (NDCI), obtido por meio de imagens de sensoriamento remoto, utilizando bandas específicas do satélite Sentinel-2. Os valores de NDCI calculados são então convertidos em concentrações de clorofila-a (Chl-a) utilizando o modelo AlgaeMAp, que foi desenvolvido para estimar a biomassa fitoplanctônica de forma acurada em ambientes aquáticos. Após essa conversão, os resultados são classificados de acordo com as faixas de referência da tabela, que definem cinco categorias de estado trófico: oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, supereutrófico e hipereutrófico. Para garantir a confiabilidade da análise, as concentrações de Chl-a estimadas também são comparadas com os limites estabelecidos pela CETESB, alinhados com as diretrizes da Resolução CONAMA nº 430/2011. Esse procedimento integrado permite uma avaliação abrangente da qualidade da água, combinando dados de sensoriamento remoto com parâmetros de referência normativa para assegurar uma gestão ambiental eficaz.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Índice *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI)

A partir da análise do *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI), obtido por meio de imagens do satélite Sentinel-2, foram gerados resultados que refletem o comportamento desse índice no Reservatório de Mateus Vieira, localizado em Taquaritinga do Norte-PE, conforme ilustrado no Quadro 1. Os dados revelam uma tendência de elevação dos valores do NDCI ao longo do período histórico analisado.

Quadro 1 - Variação do espaço-temporal do NDCI no reservatório durante o período de estudo.



Fonte: Autor (2025).

A análise da variação espaço-temporal do *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI) no Reservatório Mateus Vieira, com base em dados do satélite Sentinel-2 que abrangem o período de dezembro de 2018 a abril de 2025, revela uma dinâmica complexa na concentração de Clorofila-a. O NDCI, um indicador crucial da produtividade primária e do estado trófico de ecossistemas aquáticos, demonstrou flutuações notáveis ao longo dos anos, refletindo as interações entre fatores ambientais e a biologia do reservatório.

No início do período de estudo, em dezembro de 2018, o NDCI registrou valores baixos, mas rapidamente ascendeu em 2019, exibindo uma alta variabilidade. Picos significativos foram observados em março e julho de 2019, com o índice ultrapassando 0.15, indicando períodos de maior concentração de Clorofila-a. Em contraste, o ano de 2020 foi marcado por uma queda acentuada no índice, atingindo seu valor mais baixo em fevereiro de 2020, próximo a -0.20. Essa redução drástica pode sugerir momentos de menor produtividade primária ou um aumento na turbidez da água, que pode mascarar a leitura da clorofila.

Entre 2021 e 2022, o reservatório demonstrou uma fase de recuperação e subsequente estabilização dos valores de NDCI, embora com oscilações contínuas. Notavelmente, em maio e novembro de 2021, o índice se aproximou de 0.25, indicando episódios de maior proliferação fitoplanctônica. Essa fase de recuperação e flutuação persistiu até o final de 2023, quando o NDCI atingiu seu ponto mais elevado em toda a série histórica, superando 0.30. Tal elevação pode ser associada a condições ambientais particularmente favoráveis ao crescimento do fitoplâncton, como o aumento da disponibilidade de nutrientes.

A partir do pico observado no final de 2023, o NDCI iniciou uma tendência de declínio, com valores geralmente mais baixos em 2024 e no início de 2025. Embora tenha havido uma redução em relação ao pico recente, os valores registrados em 2025, como os de janeiro e abril, mantiveram-se em patamares que, apesar de mais baixos que o pico, não se equiparam aos mínimos históricos observados em 2020.

A variação temporal do NDCI no Reservatório Mateus Vieira sublinha a importância do monitoramento contínuo para a compreensão das dinâmicas ecológicas e a identificação de possíveis impactos ambientais. As flutuações observadas podem ser influenciadas por uma série de fatores, incluindo o regime hidrológico, o aporte de nutrientes provenientes de atividades no entorno e as condições climáticas sazonais. Dessa forma, o estudo contribui para o embasamento de estratégias de gestão e conservação da qualidade da água, visando a sustentabilidade do ecossistema aquático.

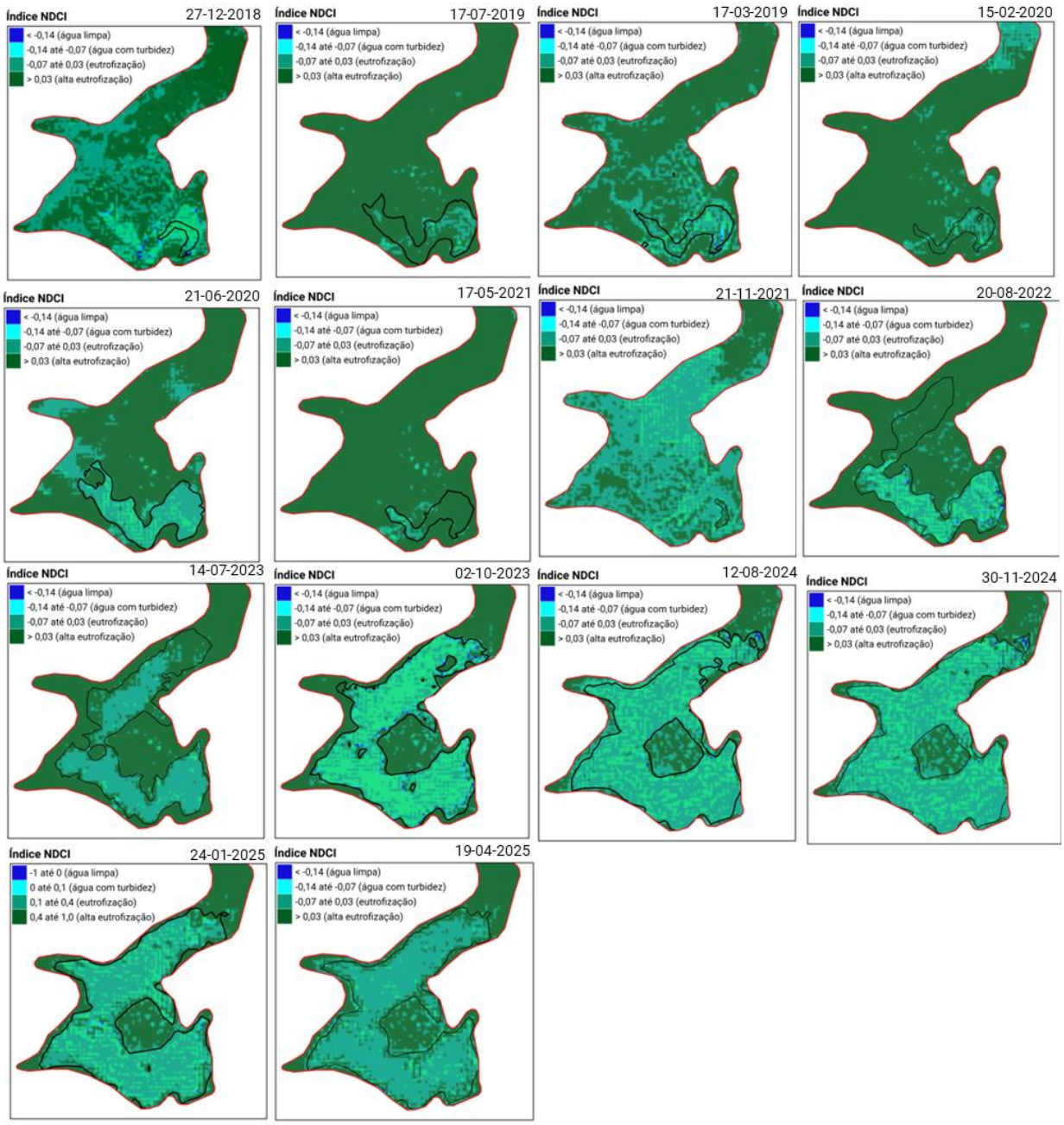
Conforme evidenciado na Figura 6, um fator determinante para os elevados valores históricos do *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI) é a variação do espelho d'água no Reservatório de Mateus Vieira. Essa variação refere-se às alterações na área superficial do corpo hídrico, resultantes de processos sazonais, climáticos e antrópicos, que influenciam diretamente a concentração de Clorofila-a e, consequentemente, o comportamento do NDCI. A redução do espelho d'água, comumente associada aos períodos de seca prolongada, aumento da evaporação e diminuição da recarga hídrica, promove a concentração de nutrientes e a redução da profundidade da coluna d'água, criando condições mais favoráveis para a

proliferação de fitoplâncton, especialmente cianobactérias, que tendem a se acumular em águas mais rasas e estáticas (SOUZA *et al*., 2021). Esse acúmulo de biomassa fitoplanctônica, rico em pigmentos fotossintéticos, como a clorofila-a, reflete em um aumento dos índices espectrais associados, como o NDCI.

Conforme destacado no estudo, a variação do espelho d'água no Reservatório Poções, PB, é um fator determinante para os valores observados do Índice de Clorofila por Diferença Normalizada (NDCI). Essa variação está associada a mudanças na área superficial do corpo hídrico, influenciada por fatores sazonais, climáticos e antrópicos, que impactam diretamente a concentração de Clorofila-a e, consequentemente, o comportamento do NDCI (SILVA *et al*., 2023). A redução do espelho d'água, frequentemente observada em períodos de seca prolongada, como o ocorrido entre 2012 e 2017, quando o reservatório atingiu apenas 0,35% de sua capacidade, promove a concentração de nutrientes e a diminuição da profundidade da coluna d'água. De acordo com Silva *et al*. (2023), essas condições criam um ambiente propício para a proliferação de fitoplâncton, especialmente em áreas mais rasas e próximas às margens, onde foram identificados os maiores valores de NDCI. O acúmulo de biomassa fitoplanctônica, rica em pigmentos fotossintéticos como a Clorofila-a, reflete-se no aumento dos índices espectrais, como observado no NDCI, evidenciando a importância do monitoramento contínuo para a gestão da qualidade da água em reservatórios sujeitos a variações hidrológicas significativas.

Além disso, em cenários de redução do volume hídrico, há um impacto significativo na dinâmica da luz na coluna d'água, com maior penetração da radiação solar até o fundo, favorecendo o crescimento de organismos fotossintetizantes (GUIMARÃES; NETO, 2023). O processo de estratificação térmica também pode ser intensificado, limitando a circulação vertical de nutrientes e promovendo condições anóxicas em camadas mais profundas, o que, paradoxalmente, pode estimular a floração de algas na superfície. Por outro lado, o aumento temporário do espelho d'água, decorrente de eventos de chuva intensa, pode levar à ressuspensão de sedimentos, contribuindo para a liberação de nutrientes anteriormente depositados, o que também favorece o crescimento do fitoplâncton e, consequentemente, o aumento do NDCI. Dessa forma, a flutuação do espelho d'água atua como um fator-chave para explicar as variações observadas no NDCI ao longo do tempo, ressaltando a importância do monitoramento contínuo e da análise integrada de variáveis hidrológicas e ambientais para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Figura 6 - Painel de análise do NDCI do reservatório de Mateus Vieira durante o período de estudo.



Fonte: Autor (2025).

A análise do NDCI no Reservatório de Mateus Vieira, abrangendo o período de 2018 a 2025, revela uma dinâmica complexa e variações significativas nas condições da superfície da água, conforme ilustrado pela série temporal de imagens.

Inicialmente, em 27 de dezembro de 2018, os valores do NDCI apresentavam-se predominantemente baixos, com extensas áreas indicando água limpa ou com baixa turbidez,

denotando um cenário de menor intensidade de eutrofização. Essa condição de relativa estabilidade é corroborada pela observação em 17 de março de 2019, onde o reservatório manteve características semelhantes, com predominância de água limpa a turbidez moderada.

No entanto, em 17 de julho de 2019, observa-se um aumento expressivo do índice, com a emergência de áreas mais extensas apresentando valores indicativos de eutrofização, sinalizando uma alteração nas condições da superfície da água. A transição para um estado de maior eutrofização prossegue em 15 de fevereiro de 2020, onde a presença de áreas com índices elevados se torna mais notória.

A intensificação desse comportamento é evidente em 21 de junho de 2020, quando o NDCI demonstra uma expansão ainda maior de áreas com índices de eutrofização e alta eutrofização, sugerindo uma tendência de crescimento contínuo ao longo do tempo. Essa progressão é mantida em 17 de maio de 2021 e 21 de novembro de 2021, períodos nos quais a disseminação de condições eutróficas se consolida, com o reservatório exibindo uma predominância de águas com turbidez e eutrofização.

Em 20 de agosto de 2022, a área afetada pela eutrofização e alta eutrofização continua a se expandir, indicando uma deterioração progressiva da qualidade da água. Essa tendência culmina em 14 de julho de 2023, onde vastas porções do reservatório já exibem altos índices de NDCI, precedendo o pico.

O pico mais evidente e crítico ocorre em 02 de outubro de 2023, quando o NDCI atinge seus maiores valores em toda a extensão do reservatório. A distribuição homogênea de índices elevados, predominantemente na faixa de alta eutrofização, indica um cenário de intensificação máxima das condições observadas, com a proliferação de biomassa algal em praticamente toda a área.

Nos anos subsequentes, observa-se uma leve, porém notável, variação. Em 12 de agosto de 2024, embora áreas significativas ainda apresentem índices elevados de eutrofização e alta eutrofização, há uma aparente redução na homogeneidade e intensidade do pico anterior, sugerindo uma flutuação ou mitigação parcial em algumas regiões. Essa tendência é similar em 30 de novembro de 2024, onde a eutrofização permanece expressiva, mas com alguma variabilidade espacial.

Em 24 de janeiro de 2025, com uma escala de NDCI ligeiramente ajustada, a análise visual ainda aponta para a persistência de condições de eutrofização e alta eutrofização em grande parte do reservatório. Finalmente, em 19 de abril de 2025, o reservatório continua a exibir áreas significativas de eutrofização, embora algumas porções possam indicar uma leve recuperação ou variação nas concentrações.

Em síntese, a série temporal do NDCI no Reservatório de Mateus Vieira demonstra uma clara progressão da eutrofização, com um pico acentuado em outubro de 2023, seguido por uma manutenção de altos níveis, mas com alguma variabilidade nos anos mais recentes. Esse comportamento dinâmico sublinha a imperatividade do monitoramento contínuo para a compreensão das complexas interações e dinâmicas associadas ao NDCI e à saúde ecossistêmica do reservatório.

Em estudo similar, a análise temporal do NDCI no Reservatório Poções, PB, entre 2021 e 2022, revelou variações significativas no comportamento do índice, refletindo mudanças nas condições da superfície da água. Em dezembro de 2021, os valores de NDCI apresentaram uma amplitude considerável, variando entre -0,1705 e 0,9636, com uma média de 0,1804, indicando a presença de áreas com diferentes concentrações de clorofila-a (SILVA *et al*., 2023). Já em abril de 2022, observou-se um aumento nos valores médios do NDCI (0,2581), sugerindo uma maior concentração de biomassa fitoplanctônica, possivelmente associada a mudanças sazonais ou hidrológicas. Em novembro de 2022, os valores de NDCI diminuíram, com uma média de 0,1155, indicando uma redução na concentração de clorofila-a em comparação com os meses anteriores (SILVA *et al*., 2023).

Essas variações podem estar relacionadas a fatores como a entrada de águas do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), que impactou o volume e a qualidade da água no reservatório, além de condições climáticas e antrópicas que influenciam a dinâmica do ecossistema aquático (ANA/AESA, 2022). A predominância de valores de NDCI entre 0 e 0,5 ao longo do período analisado sugere a presença de matéria orgânica e a necessidade de monitoramento contínuo para evitar cenários de eutrofização, conforme previsto no Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba (PARAÍBA, 2022). A ferramenta mostrou-se eficaz na identificação de padrões espaciais e temporais, destacando a importância do sensoriamento remoto como complemento aos métodos tradicionais de monitoramento da qualidade da água (POMPÊO *et al*., 2021).

É imperativo ressaltar que o comportamento dos valores do NDCI (*Normalized Difference Chlorophyll Index*) no período analisado demonstra uma correlação direta com as variações volumétricas do Reservatório Mateus Vieira. A literatura especializada (AUBRIOT et al., 2020) corrobora que as flutuações no nível do espelho d'água exercem influência significativa no desempenho deste índice de detecção de clorofila, evidenciando uma interdependência entre os parâmetros hidrológicos e a resposta espectral. Para contextualizar essa relação, a Tabela 2 detalha a variação volumétrica registrada durante o período de estudo.

Tabela 3 - Variação do volume percentual do Reservatório de Mateus Vieira (2018 – 2025).

Data	Volume (%)	Estado
27.12.2018	6,27	Volume morto
17.03.2019	3,37	Volume morto
17.07.2019	0,82	Volume morto
15.02.2020	4,00	Volume morto
21.06.2020	9,45	Volume morto
17.05.2021	3,27	Volume morto
21.11.2021	0,00	Volume morto
20.08.2022	17,82	Normal
14.07.2023	48,73	Normal
02.10.2023	52,00	Normal
12.08.2024	76,98	Normal
30.11.2024	60,73	Normal
24.01.2025	52,00	Normal
19.04.2025	48,36	Normal
Média	**27,43**	**-**

Fonte: ANA (2025).

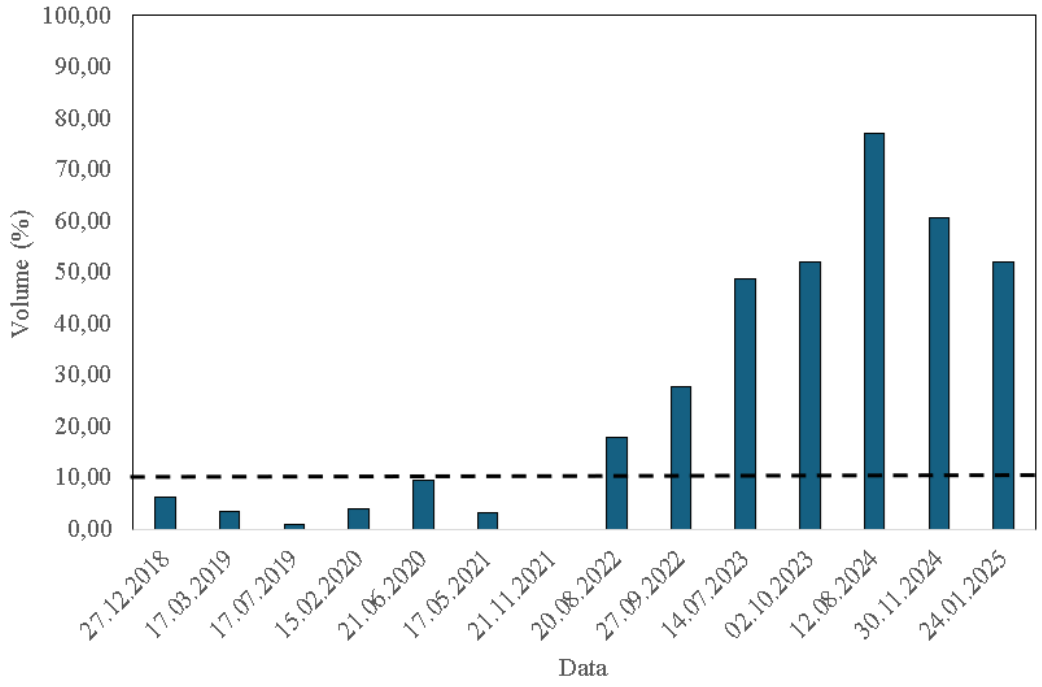
Os resultados demonstram uma correlação significativa entre os valores do NDCI e as variações volumétricas do reservatório. Esta relação indica que a redução no volume armazenado está associada ao incremento nos processos de eutrofização, conforme evidenciado pelo aumento dos índices de clorofila detectados por sensoriamento remoto. Tais achados sugerem que o esvaziamento progressivo do reservatório potencializa a concentração de nutrientes e a proliferação de biomassa algal, caracterizando um quadro típico de aceleração eutrófica em corpos hídricos represados (GLIBERT, 2017).

A análise temporal conjunta dos dados do NDCI e da variação volumétrica do Reservatório de Mateus Vieira corrobora essa interdependência. Em 27 de dezembro de 2018, o reservatório apresentava um volume de 6,27% (volume morto), com o NDCI indicando predominantemente água limpa. Contudo, a progressiva redução do volume, atingindo 0,82% em 17 de julho de 2019 e, criticamente, 0,00% em 21 de novembro de 2021, coincidiu com um aumento notável nos valores do NDCI. Observa-se que, a partir de 17 de julho de 2019, e de forma mais acentuada em 21 de junho de 2020 e 21 de novembro de 2021, as áreas com índices de eutrofização e alta eutrofização expandiram-se significativamente, refletindo a concentração de nutrientes e a proliferação algal em um ambiente com volume hídrico reduzido.

Mesmo com a recuperação volumétrica do reservatório a partir de 20 de agosto de 2022 (17,82%) e alcançando 52,00% em 02 de outubro de 2023, o NDCI atingiu seu pico mais elevado. Este fenômeno, onde a máxima eutrofização ocorre em um período de volume já recuperado, sugere um efeito de retardo na resposta do ecossistema. A concentração de nutrientes e a biomassa algal acumuladas durante os períodos de baixo volume podem ter persistido e se manifestado plenamente mesmo após a elevação do nível da água, resultando em uma distribuição homogênea de índices elevados em toda a área do reservatório em 02 de outubro de 2023.

Nos períodos subsequentes, como em 12 de agosto de 2024 (76,98% de volume) e 24 de janeiro de 2025 (52,00% de volume), apesar dos volumes elevados, os valores do NDCI permaneceram significativamente altos em comparação com o início da série temporal. Isso indica que, uma vez estabelecido o quadro de eutrofização, a simples recuperação volumétrica pode não ser suficiente para reverter rapidamente o estado trófico do reservatório, demandando um monitoramento contínuo e, possivelmente, intervenções de manejo para mitigar os impactos da eutrofização. O Quadro 2 a seguir apresenta o comportamento volumétrico.

Quadro 2 - Variação do espaço-temporal do volume no reservatório durante o período de estudo.



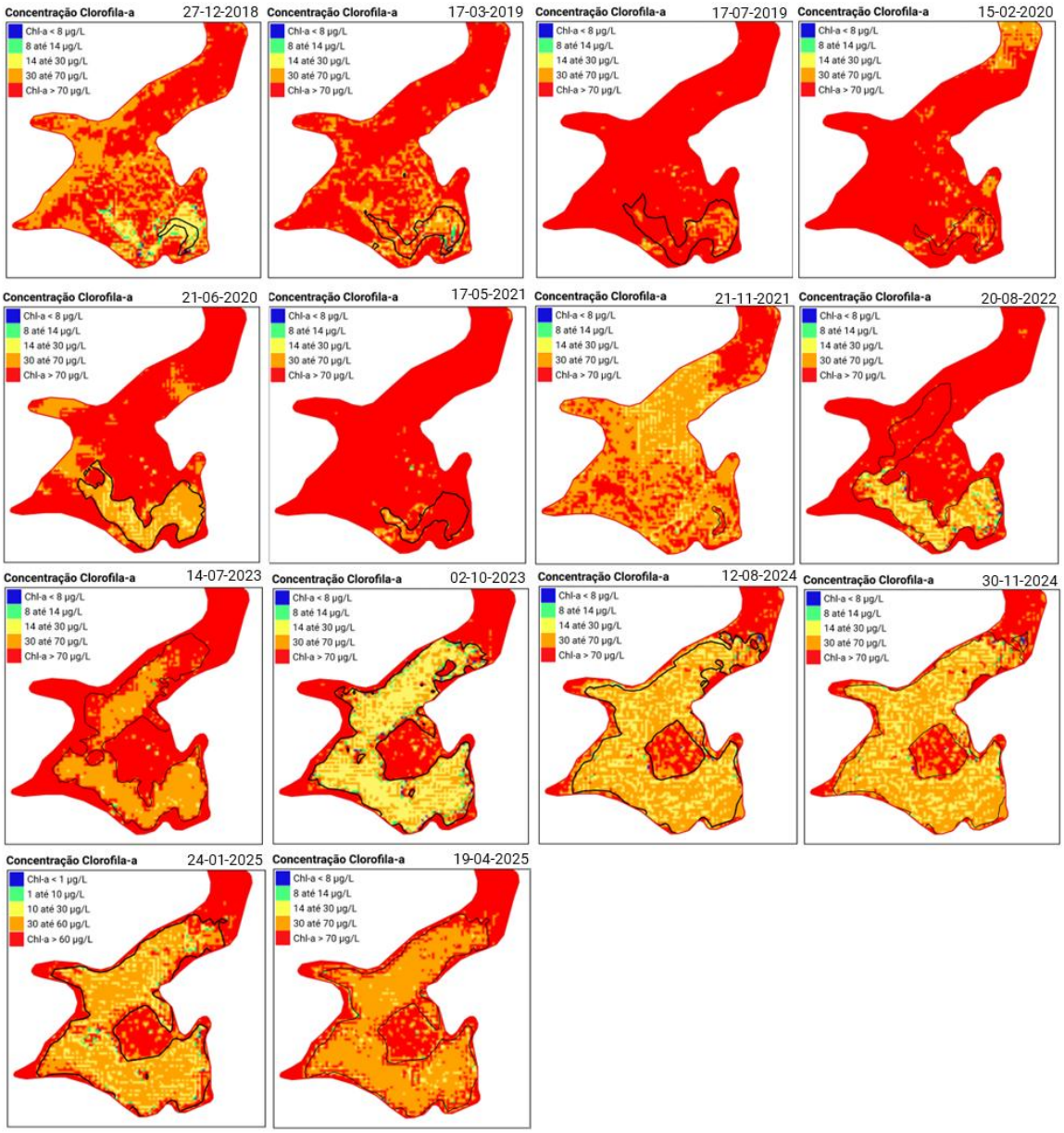
Nota: Volume inferior a 10% no reservatório é considerado volume morto.

Fonte: ANA (2025).

6.2 Distribuição Espaço-Temporal Clorofila-A (Chl-a)

O NDCI é um indicador diretamente associado à presença de Chl-a em ambientes aquáticos. Essa relação permite não apenas a identificação da presença desse pigmento, mas também a análise de sua distribuição espacial ao longo do corpo hídrico. Com base nessa correlação, torna-se possível mapear de forma precisa a variação dos níveis de Chl-a no Reservatório de Mateus Vieira, evidenciando áreas com maior ou menor concentração. A Figura 7 a seguir ilustra essa distribuição.

Figura 7 - Painel de análise da clorofila-a no reservatório de Mateus Vieira durante o período de estudo.



Fonte: Autor (2025).

A avaliação da concentração de Chl-a no Reservatório de Mateus Vieira, abrangendo o período de 2018 a 2025, desvenda uma dinâmica temporal intrincada. Observam-se variações notáveis que sinalizam transformações no estado trófico desse corpo d'água ao longo do tempo.

Em 27 de dezembro de 2018, os teores de Chl-a mostravam-se relativamente baixos. A maior parte do ambiente aquático exibia medições inferiores a 8 µg/L, com apenas algumas regiões pontuais registrando entre 8 e 14 µg/L. Este cenário inicial sugere condições de menor produtividade primária. Uma situação bastante similar, com um leve incremento nas zonas de 8 a 14 µg/L, foi constatada em 17 de março de 2019. No entanto, a partir de 17 de julho de 2019, uma alteração mais pronunciada começou a se manifestar. Houve o surgimento de porções com concentrações de Chl-a entre 14 e 30 µg/L e, de forma ainda incipiente, entre 30 e 70 µg/L. Essa inclinação de elevação na concentração de Chl-a ganhou intensidade em 15 de fevereiro de 2020, quando as extensões com valores acima de 30 µg/L, e até mesmo superiores a 70 µg/L, tornaram-se mais evidentes e espacialmente expandidas, indicando um aumento expressivo na biomassa algal.

O período subsequente, que engloba 21 de junho de 2020 e 17 de maio de 2021, revelou uma consolidação de teores elevados de Chl-a. Em ambas as datas, vastas porções do reservatório apresentavam valores consistentemente acima de 70 µg/L, o que caracteriza um estado de eutrofização avançada.

Uma transição marcante ocorreu em 21 de novembro de 2021, quando se verificou uma expansão ainda mais acentuada das áreas com as mais altas concentrações de Chl-a (superiores a 70 µg/L), cobrindo virtualmente toda a extensão do reservatório. Esse padrão de biomassa algal elevada manteve-se em 20 de agosto de 2022, embora com uma ligeira retração das áreas de concentração máxima em comparação com o cenário de novembro de 2021.

A concentração de Chl-a alcançou um novo patamar em 14 de julho de 2023 e, de maneira mais crítica, em 02 de outubro de 2023. Nessas datas, o corpo hídrico exibiu uma predominância de áreas com concentrações entre 30 e 70 µg/L, além de vastas zonas com valores excedendo 70 µg/L. Tal configuração aponta para um ápice de floração algal e a instauração de um estado hipereutrófico. Nos períodos seguintes, 12 de agosto de 2024 e 30 de novembro de 2024, os níveis de Chl-a permaneceram elevados. A distribuição espacial assemelhava-se à observada em outubro de 2023, embora com uma possível e sutil diminuição na intensidade em certas áreas, ainda assim caracterizando um estado que varia de eutrófico a hipereutrófico.

Por fim, em 24 de janeiro de 2025, com uma legenda de concentração ligeiramente reajustada (onde Chl-a > 60 µg/L representava a categoria máxima), e em 19 de abril de 2025

(retornando à legenda original de Chl-a > 70 μg/L), o reservatório continuou a exibir extensas áreas com altos teores de Chl-a, indicando a continuidade de condições eutróficas.

Em síntese, a série temporal da concentração de Clorofila-a no Reservatório de Mateus Vieira demonstra um incremento gradual da biomassa algal. Esse processo atingiu o ápice em picos de eutrofização e hipereutrofização, notadamente a partir de 2020, com o período mais crítico registrado entre meados e o final de 2023. A manutenção de concentrações elevadas nos anos subsequentes sugere um desequilíbrio no ecossistema aquático, o que demanda atenção contínua e, potencialmente, a implementação de medidas de manejo para o controle do enriquecimento trófico.

Os efeitos negativos da alta presença de Clorofila-a no reservatório são diversos e impactam significativamente o equilíbrio ecológico e a qualidade da água. O excesso desse pigmento indica um crescimento descontrolado de organismos fotossintetizantes, o que pode levar à redução da transparência da água, dificultando a penetração da luz e afetando organismos submersos dependentes da fotossíntese. Além disso, o acúmulo de biomassa pode resultar em um aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), contribuindo para condições de hipóxia (baixa concentração de oxigênio dissolvido) e até anóxia (ausência de oxigênio), prejudicando a fauna aquática e levando à morte de peixes e outros organismos. A decomposição dessa biomassa também pode liberar compostos tóxicos e gerar odores desagradáveis, comprometendo o uso da água para abastecimento humano, recreação e atividades econômicas, como a pesca. Diante desse cenário, é fundamental a implementação de estratégias de gestão integrada dos recursos hídricos, com foco no monitoramento contínuo e na redução da carga de nutrientes, visando mitigar os impactos observados e promover a recuperação ambiental do reservatório. Os impactos negativos da eutrofização, como a redução da transparência da água e a hipóxia, são amplamente documentados na literatura. Lobo *et al*. (2021) destacam que o monitoramento contínuo de parâmetros como a Clorofila-a é essencial para a detecção precoce de blooms de algas e para a implementação de medidas de controle. Além disso, a decomposição da biomassa fitoplanctônica pode liberar toxinas, como microcistinas, que representam riscos à saúde humana e à biodiversidade aquática (WATANABE *et al*., 2018). A implementação de estratégias de gestão integrada, como a redução de cargas de nutrientes e o monitoramento em tempo real, é crucial para mitigar esses impactos e garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos (POMPÊO *et al*., 2021).

6.3 Índice do Estado Trófico (IET)

Para avaliar a qualidade da água e o nível de produtividade biológica do Reservatório de Mateus Vieira, foi determinado o Índice de Estado Trófico (IET), uma métrica amplamente utilizada para classificar corpos d'água com base na concentração de nutrientes e biomassa algal. O IET pode ser estimado por diferentes parâmetros, incluindo o *Normalized Difference Chlorophyll* Index (NDCI) e a concentração de Clorofila-a (Chl-a), ambos indicadores relevantes para o monitoramento da produtividade primária e o estado trófico de sistemas aquáticos (BUENO *et al*., 2023).

A Tabela 1 anteriormente apresentada demonstra faixas de classificação do estado trófico com base em três parâmetros distintos: o *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI), calculado a partir de imagens de sensoriamento remoto conforme metodologia proposta por Lobo *et al.* (2021); a concentração de Chl-a, também estimada com base no mesmo estudo; e a concentração de Clorofila-a definida de acordo com os critérios da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). A utilização desses parâmetros é essencial para uma análise comparativa abrangente, pois permite avaliar o nível de enriquecimento de nutrientes nos corpos d'água, refletindo diretamente o grau de alteração da qualidade da água e auxiliando na compreensão da dinâmica ecológica do ambiente aquático analisado.

A partir da Tabela 1 apresentada, é possível observar uma correlação direta entre o NDCI e a concentração de Chl-a, tanto para os dados obtidos por sensoriamento remoto (AlgaeMap) quanto para os critérios estabelecidos pela CETESB. O aumento dos valores de NDCI está associado a um incremento na concentração de Clorofila-a, refletindo um maior acúmulo de biomassa fitoplanctônica, característica de ambientes com alta disponibilidade de nutrientes (MATHEW; SINGH; GOPINATH, 2021).

O NDCI é um índice espectral sensível à presença de pigmentos fotossintéticos, especialmente a Clorofila-a, sendo eficiente para detectar variações espaciais e temporais na qualidade da água por meio de imagens de satélite. Já o parâmetro Chl-a (AlgaeMap) representa a estimativa da concentração de Clorofila-a derivada de algoritmos de processamento de imagens, enquanto o Chl-a (CETESB) refere-se à concentração obtida por métodos laboratoriais tradicionais. Embora as faixas de classificação apresentem variações nos limites, observa-se uma consistência nos padrões de transição entre os estados tróficos, indicando que ambos os métodos são complementares para o diagnóstico ambiental (SILVA *et al*. 2021).

Essa correlação evidência a importância do uso integrado de tecnologias de sensoriamento remoto e análises laboratoriais no monitoramento da qualidade da água, proporcionando uma abordagem mais abrangente e precisa para a gestão de recursos hídricos.

6.3.1 IET do Reservatório Mateus Vieira

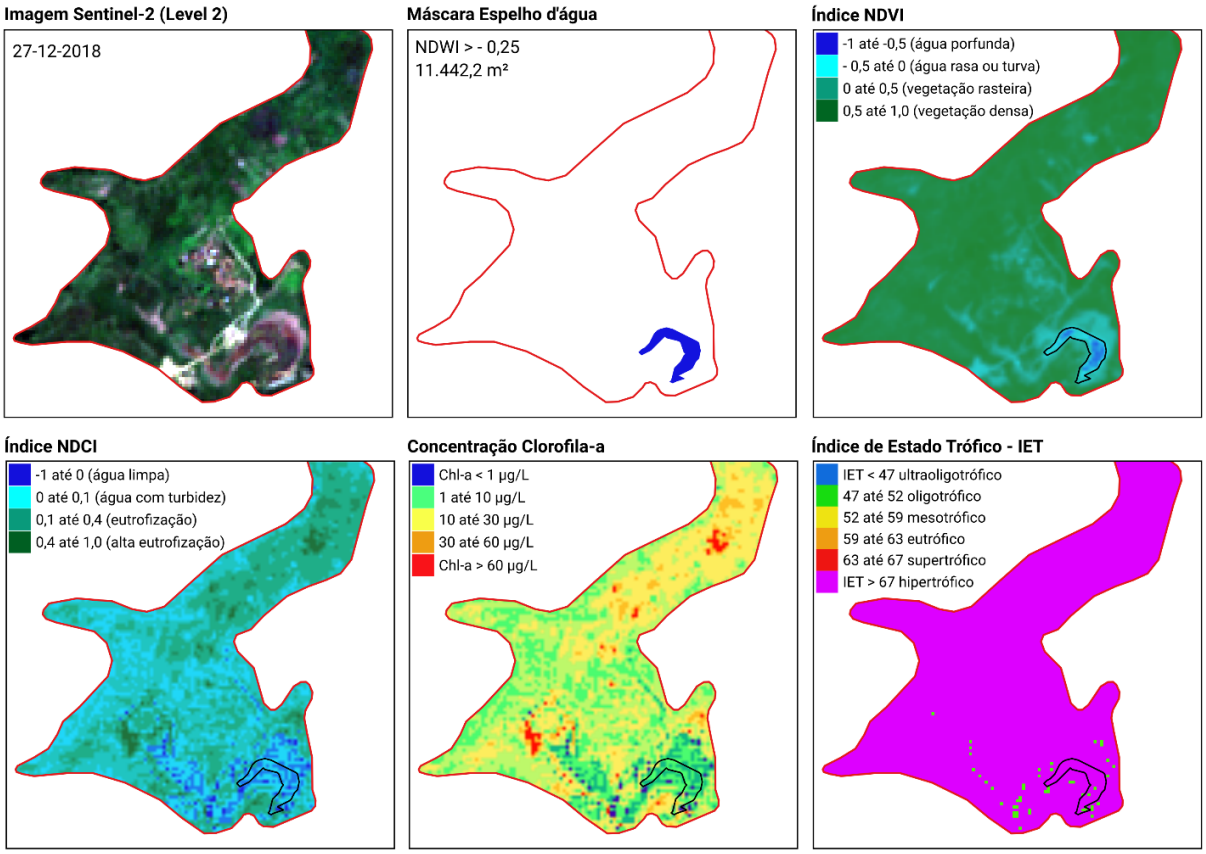
Para a determinação do Índice de Estado Trófico (IET) do Reservatório Mateus Vieira, localizado em Taquaritinga do Norte-PE, é fundamental estabelecer uma correlação precisa entre os dados obtidos por meio de imagens de sensoriamento remoto e os critérios de classificação apresentados na Tabela 1, elaborada com base na metodologia de Lobo *et al.* (2021). O uso de imagens de satélite, associado ao NDCI, possibilita uma avaliação detalhada e em tempo quase real das condições ambientais do reservatório, permitindo a identificação de alterações na qualidade da água com maior eficiência em comparação aos métodos tradicionais.

A Tabela 1 apresenta as faixas de classificação do estado trófico com base em três parâmetros distintos: o NDCI (AlgaeMap), a concentração de Clorofila-a (Chl-a) também estimada via AlgaeMap, e a concentração de Clorofila-a de acordo com os critérios da CETESB. O estado trófico é categorizado em cinco classes: Oligotrófico, Mesotrófico, Eutrófico, Supereutrófico e Hipereutrófico, com limites específicos para cada indicador. Por exemplo, o estado oligotrófico é definido por valores de NDCI inferiores a -0,14, concentrações de Clorofila-a (AlgaeMap) abaixo de 8 µg/L, e valores de Clorofila-a (CETESB) menores que 3,24 µg/L. À medida que esses valores aumentam, o estado trófico evolui para condições mais críticas, como o estado hipereutrófico, que apresenta NDCI acima de 0,15 e concentrações de Clorofila-a superiores a 70 µg/L (AlgaeMap) e 69,05 µg/L (CETESB) (LOBO *et al*., 2021).

O presente estudo realizará a análise e correlação dos dados obtidos em diferentes períodos, especificamente nas datas: 27-12-2018, 17-07-2019, 17-03-2019, 15-02-2020, 21-06-2020, 17-05-2021, 21-11-2021, 20-08-2022, 14-07-2023, 02-10-2023, 12-08-2024, 30-11-2024, 24-01-2025 e 19-04-2025. A escolha das datas, pautada por critérios estratégicos, teve como objetivo principal apreender a variabilidade sazonal e discernir tendências temporais. Tal abordagem possibilita uma compreensão aprofundada da evolução do estado trófico do reservatório. Adicionalmente, a fusão dos parâmetros detalhados na Tabela 1 com as informações obtidas por sensoriamento remoto estabelece uma metodologia de monitoramento da qualidade da água de grande solidez. Essa sinergia oferece subsídios indispensáveis à gestão sustentável dos recursos hídricos na região. O processo de determinação do Índice de Estado

Trófico (IET) do reservatório é subsequentemente ilustrado nas Figuras que se seguem. A Figura 8 apresentada ilustra o processo de determinação do IET do Reservatório Mateus Vieira:

Figura 8 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 27-12-2018.



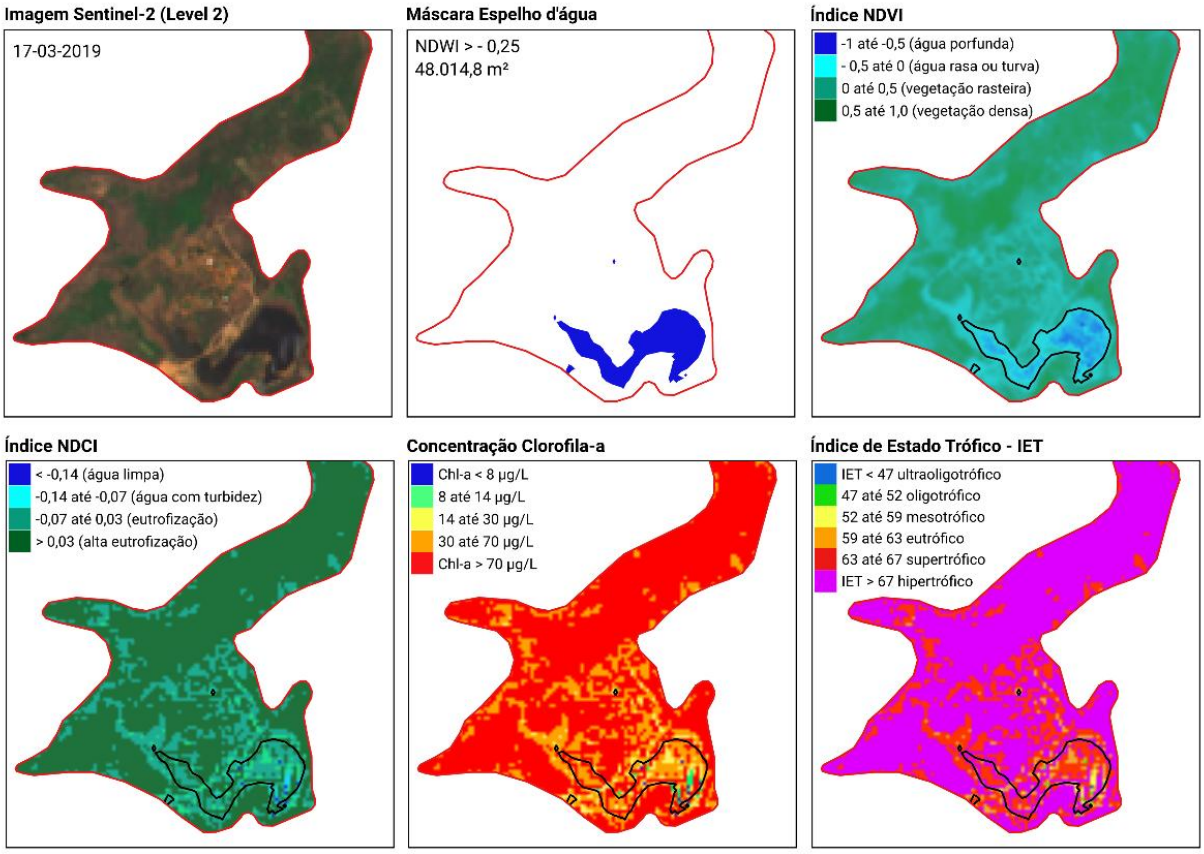
Fonte: Autor (2025).

A Figura 8 apresentada ilustra o processo de determinação do IET do Reservatório Mateus Vieira, com base em dados obtidos do satélite Sentinel-2, referentes à data de 27 de dezembro de 2018. O painel da figura é composto por seis representações que, integradas, fornecem uma análise detalhada da qualidade da água e do estado trófico do reservatório. A imagem do Sentinel-2 (Level 2) oferece uma visualização inicial da área de estudo, destacando o uso do solo e a vegetação adjacente, fatores que influenciam diretamente o aporte de nutrientes para o reservatório. A máscara do espelho d'água, obtida por meio do índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*), delimita o corpo hídrico, evidenciando uma área de 11.442,2 m², essencial para isolar as análises espectrais apenas sobre a superfície da água. A utilização do NDWI para a delimitação de corpos hídricos já foi aplicada em diversos estudos,

demonstrando sua eficácia na diferenciação entre água e outros elementos da paisagem (KARIMI *et al*., 2024). No estudo de Nascimento *et al*. (2024), essa metodologia também foi empregada para identificar a presença de macrófitas aquáticas no reservatório de Itaipu, destacando sua importância na caracterização da qualidade ambiental. A precisão desse índice contribui para a obtenção de informações confiáveis sobre a área ocupada pela lâmina d'água, sendo crucial para o monitoramento de reservatórios com alta variação na superfície aquática.

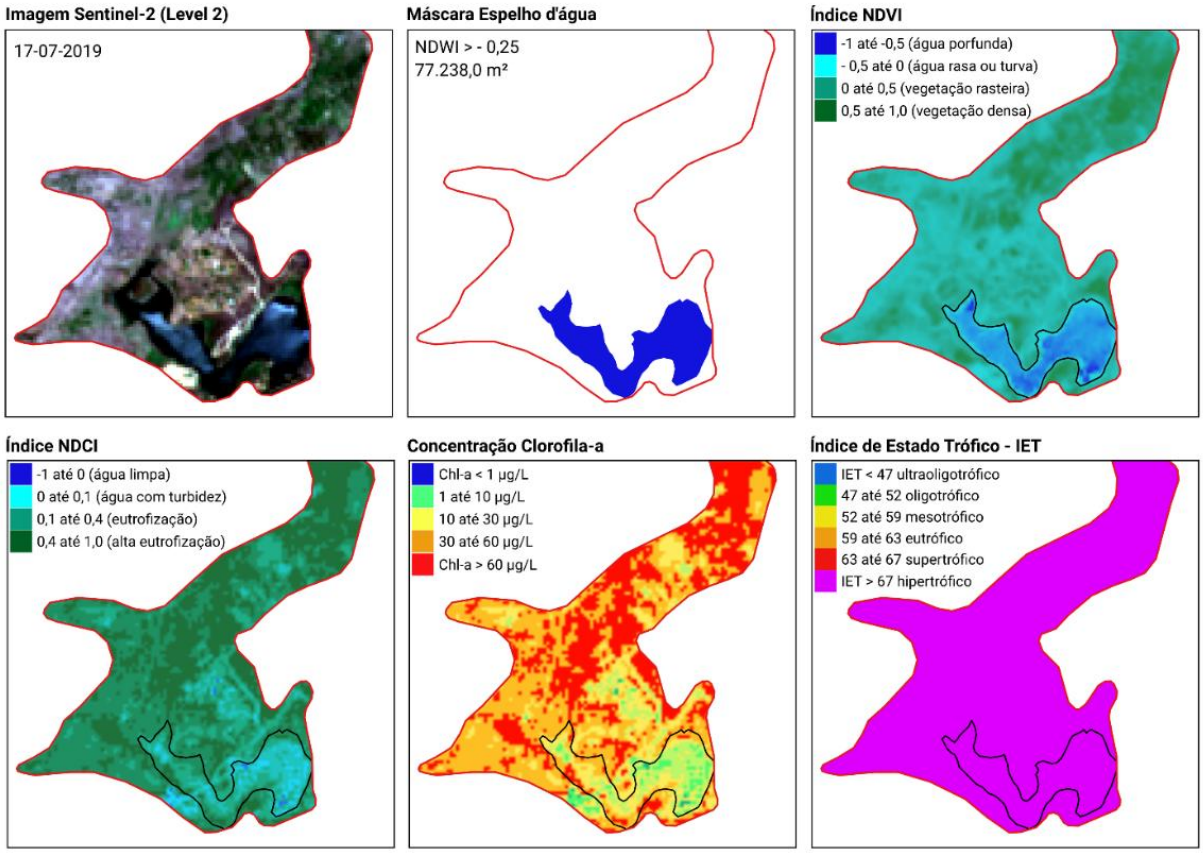
O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) revela a densidade da vegetação circundante, sendo um indicativo do potencial de escoamento de nutrientes. O Índice de NDCI aponta valores majoritariamente entre 0 e 0,1, caracterizando áreas de água com turbidez moderada e presença de matéria orgânica em suspensão, o que sugere um estado trófico de transição entre mesotrófico e eutrófico, conforme a Tabela 1. A concentração de Clorofila-a reforça essa interpretação, com predominância de valores entre 10 e 30 µg/L, indicando níveis significativos de biomassa fitoplanctônica. O mapa final do IET destaca uma condição crítica, com predominância da classe hipereutrófico (IET > 67), sugerindo um ambiente aquático sob forte influência de nutrientes, possivelmente devido ao aporte de efluentes agrícolas e urbanos, bem como à baixa renovação hídrica. Esses resultados evidenciam a necessidade de ações de gestão ambiental voltadas para a mitigação da eutrofização e a preservação da qualidade da água do reservatório (MARKAD *et al*., 2019). A seguir temos a Figura 9 e 10 apresentado a análises das datas 17-03-2019 e 17-07-2019.

Figura 9 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 17-03-2019.



Fonte: Autor (2025).

Figura 10 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 17-07-2019.



Fonte: Autor (2025).

A avaliação do Reservatório Mateus Vieira, utilizando dados do satélite Sentinel-2, revela uma dinâmica hídrica e trófica significativa entre março e julho de 2019. Em 17 de julho de 2019 (Figura 10), o espelho d'água do reservatório atingiu 77.238 m², representando uma expansão considerável em comparação aos 48.014,8 m² registrados em 17 de março de 2019 (Figura 9). Essa variação na área pode ser atribuída a fatores climáticos sazonais, como o aumento das chuvas, que contribuem para o incremento do volume hídrico e, consequentemente, para o aporte de nutrientes ao sistema.

O NDVI para ambas as datas (Figuras 9 e 10) indica a persistência de vegetação nas áreas periféricas. Contudo, a expansão do corpo hídrico em julho de 2019 sugere um aumento das zonas de água rasa, um fator que pode favorecer a concentração de nutrientes e o subsequente crescimento de organismos fitoplanctônicos.

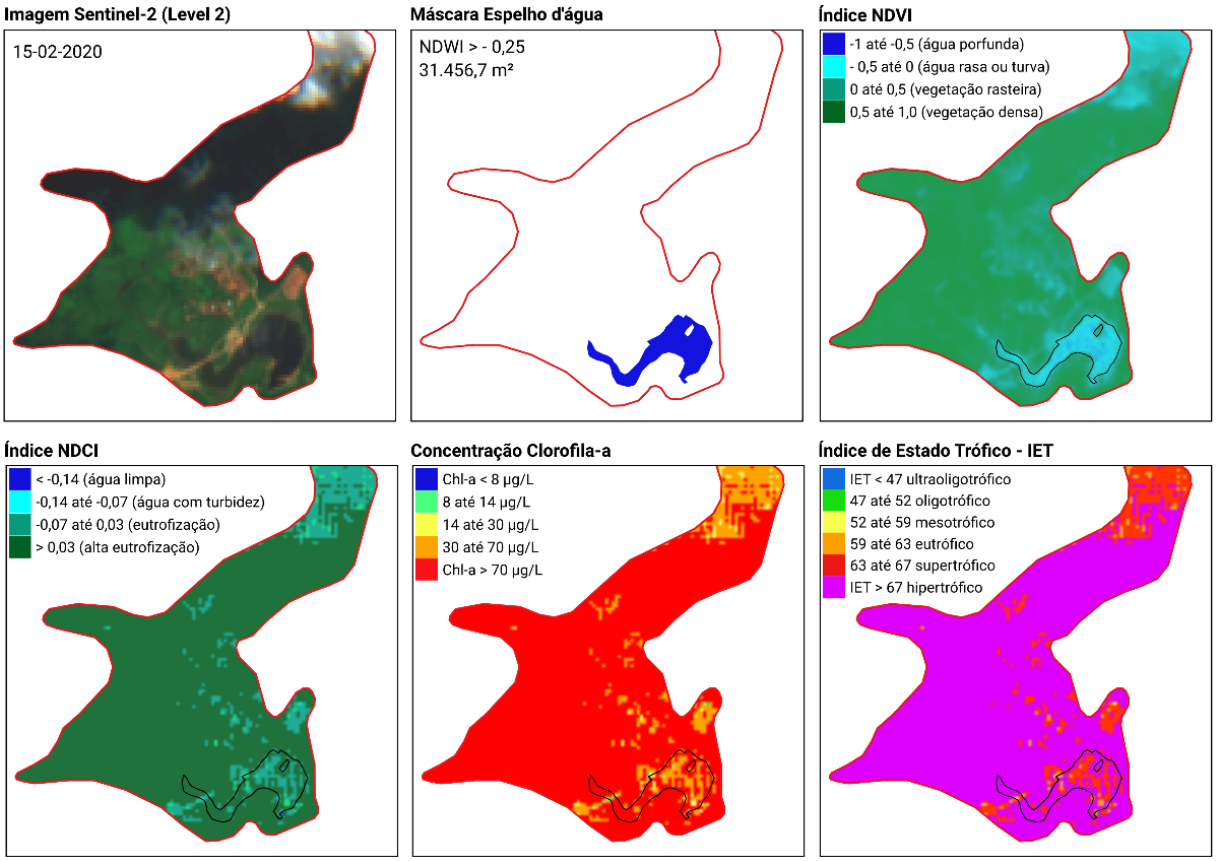
No que tange à qualidade da água, o Índice de Clorofila-a por NDCI de 17 de julho de 2019 (Figura 10) aponta para valores predominantemente elevados, com grande parte do reservatório exibindo índices entre 0,1 e 1,0, o que denota um processo de eutrofização acentuado. Este achado é corroborado pela concentração de Clorofila-a (Figura 10), que mostra

extensas áreas com valores superiores a 60 µg/L, indicando condições críticas para a qualidade da água. Em comparação, embora a concentração de Clorofila-a já fosse elevada em março de 2019 (Figura 9), com áreas acima de 70 µg/L, a abrangência das zonas mais afetadas parece ter se intensificado em julho. A literatura, como Nascimento et al. (2024), ao identificar valores médios de Clorofila-a entre 30 e 50 µg/L em outros reservatórios nordestinos, sublinha a preocupante condição de degradação do reservatório Mateus Vieira.

O mapeamento do Índice de Estado Trófico (IET) para 17 de julho de 2019 (Figura 10) revela uma situação alarmante, com a maior parte do reservatório classificada como hipereutrófico (IET > 67). Esse avanço no estado trófico pode ser atribuído ao acúmulo de nutrientes, provavelmente decorrente do escoamento superficial agrícola e da decomposição de matéria orgânica, exacerbados pela maior retenção hídrica. Musyoka *et al*. (2023) destacam que reservatórios com IET superior a 67 frequentemente exibem elevada turbidez, redução na penetração de luz e favorecem o desenvolvimento de cianobactérias, comprometendo a potabilidade e o uso recreativo da água.

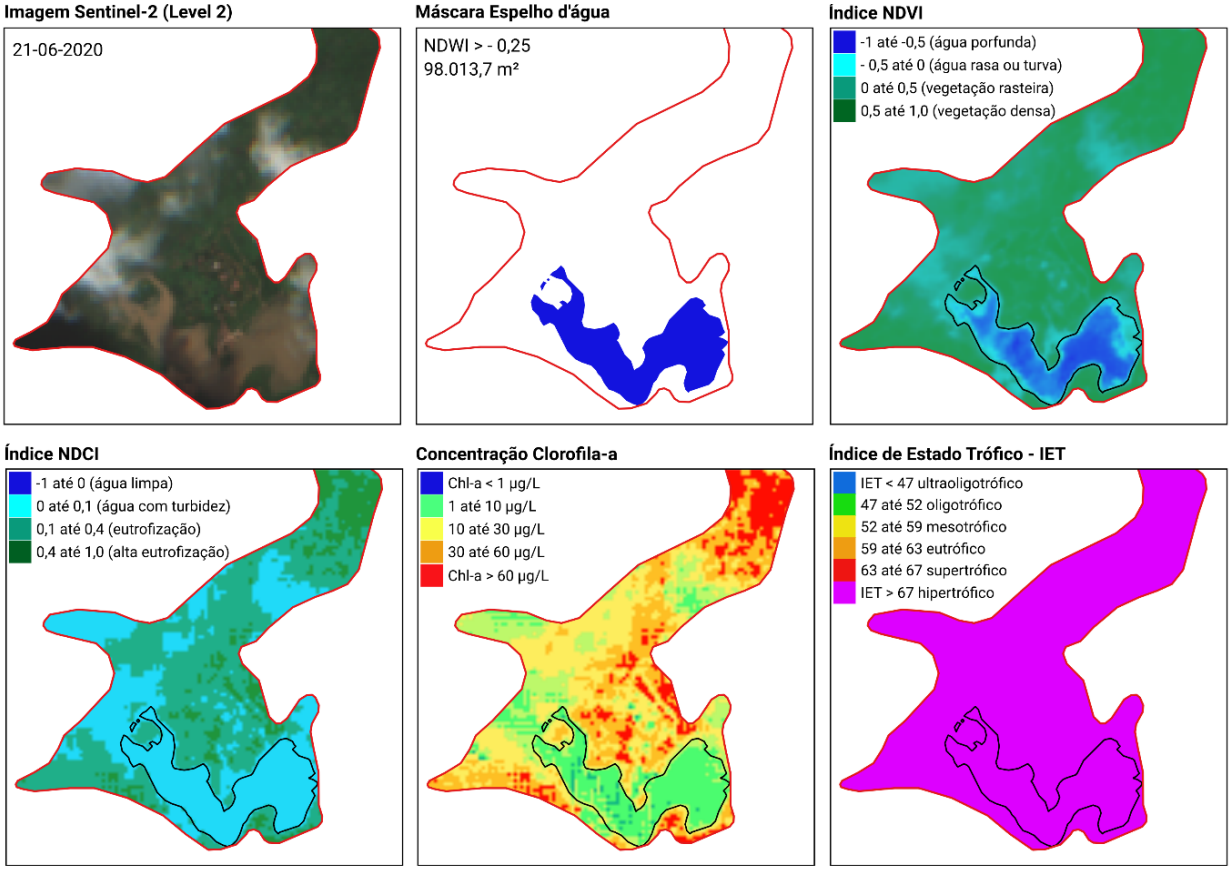
Em suma, os resultados evidenciam a vulnerabilidade do reservatório a processos de degradação ambiental, exigindo a implementação urgente de medidas de manejo para mitigar o impacto da eutrofização sobre o ecossistema aquático. Estratégias como a implantação de zonas de amortecimento vegetadas e a regulação da carga de nutrientes oriunda de atividades agrícolas são fundamentais para conter o avanço da degradação. A adoção de práticas sustentáveis, como o uso de biofiltros e sistemas de retenção de sedimentos, conforme apontado por estudos recentes (MUSYOKA *et al*., 2023), pode reduzir significativamente a concentração de clorofila-a e atenuar os impactos da eutrofização. A seguir temos a Figura 11 e 12 apresentado a análise da data 21-06-2020.

Figura 11 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 15-02-2020.



Fonte: Autor (2025).

Figura 12 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 21-06-2020.



Fonte: Autor (2025).

A análise comparativa do Índice de Estado Trófico (IET) do Reservatório de Mateus Vieira, com base em imagens Sentinel-2 para as datas de 15 de fevereiro de 2020 e 21 de junho de 2020, permite discernir a evolução das condições hidrológicas e biológicas do corpo d'água. Esta avaliação integra múltiplos índices de sensoriamento remoto, como NDWI, NDVI, NDCI e concentração de Clorofila-a, para fornecer uma compreensão abrangente do estado trófico do reservatório em diferentes momentos.

Em 15 de fevereiro de 2020, a máscara do espelho d'água, derivada do NDWI, indicava uma área de 31.456,7 m², denotando um volume hídrico relativamente reduzido. O NDVI predominantemente apontava para a ausência de vegetação densa, com áreas de água profunda ou rasa/turva. O NDCI revelava uma predominância de água limpa e com baixa turbidez, embora pequenas porções do corpo d'água já apresentassem indícios de eutrofização. Corroborando essa observação, a concentração de Clorofila-a (Chl-a) mostrava valores majoritariamente baixos (<8 µg/L e 8-14 µg/L), com focos de maior concentração (30-70 µg/L e >70 µg/L) restritos a áreas específicas. Consequentemente, o IET para esta data indicava um

estado predominantemente ultraoligotrófico a oligotrófico, com algumas regiões classificadas como eutróficas e hipereutróficas, refletindo a heterogeneidade espacial das condições tróficas.

Contrastando com o cenário anterior, a análise da Figura 10, datada de 21 de junho de 2020, evidencia um aumento substancial na extensão do espelho d'água, conforme a máscara NDWI, que registra 98.013,7 m². Esta expansão hídrica pode ser atribuída a fatores climáticos, como o incremento das precipitações sazonais, que promovem um maior acúmulo de água no reservatório. Contudo, conforme apontado por Silva et al. (2023), a ampliação da área alagada não implica necessariamente em uma menor concentração de nutrientes, podendo influenciar diretamente a qualidade da água. Um padrão similar foi observado no reservatório Poções-PB, onde a expansão da lâmina d'água coincidiu com o aumento da biomassa algal.

Nesta data, o NDVI revela a presença de vegetação densa nas margens, em contraste com regiões de água rasa ou turva. O NDCI destaca variações na qualidade da água, com predominância de áreas em ciano claro, indicando águas com turbidez moderada, enquanto porções em verde escuro refletem uma tendência à eutrofização. A concentração de clorofila-a exibe valores heterogêneos, variando entre 1 e 60 µg/L, com a presença de hotspots em vermelho que sugerem elevadas concentrações de biomassa fitoplanctônica, potencialmente associadas a processos de floração algal. Silva *et al*. (2023) identificaram um padrão análogo no reservatório Poções, onde valores de NDCI entre 0 e 0,5 foram predominantes, indicando uma concentração considerável de matéria orgânica e fitoplâncton. Este resultado sugere que a análise espectral por sensoriamento remoto pode fornecer estimativas confiáveis sobre a qualidade da água em diferentes reservatórios.

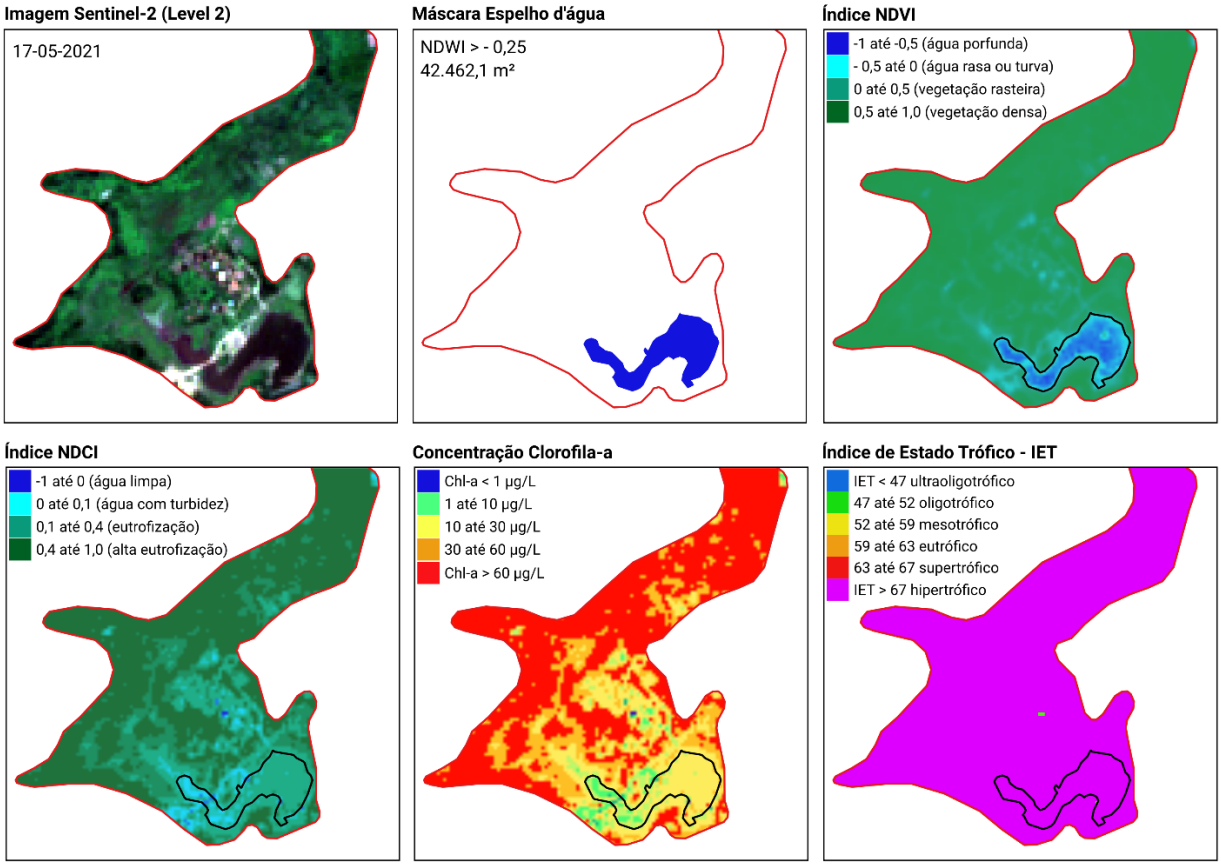
Ao correlacionar esses dados com os parâmetros da Tabela 1, o Índice de Estado Trófico evidencia uma predominância do estado hipereutrófico em grande parte do reservatório, particularmente nas regiões centrais e ao sul. Este resultado indica um acentuado enriquecimento por nutrientes, potencialmente derivado de atividades antrópicas, como o uso intensivo do solo para agricultura e o lançamento de efluentes domésticos e industriais sem tratamento adequado. Estudos prévios apontam que concentrações elevadas de clorofila-a estão correlacionadas a um aumento na biomassa de cianobactérias, organismos potencialmente tóxicos que podem comprometer o uso da água para consumo e lazer (SILVA et al., 2023). No caso do reservatório Poções, valores acima de 50 µg/L foram associados a episódios de hipereutrofia, demonstrando a relevância do monitoramento contínuo dessas variáveis.

A combinação de alta concentração de Clorofila-a, turbidez elevada e a presença de vegetação aquática contribui para um ambiente propício ao desequilíbrio ecológico, com riscos de redução da biodiversidade aquática e degradação da qualidade da água para abastecimento

e recreação. Assim, os resultados obtidos demonstram a necessidade premente de medidas de gestão ambiental para mitigar os impactos e restaurar a qualidade da água do reservatório (MUSYOKA et al., 2023).

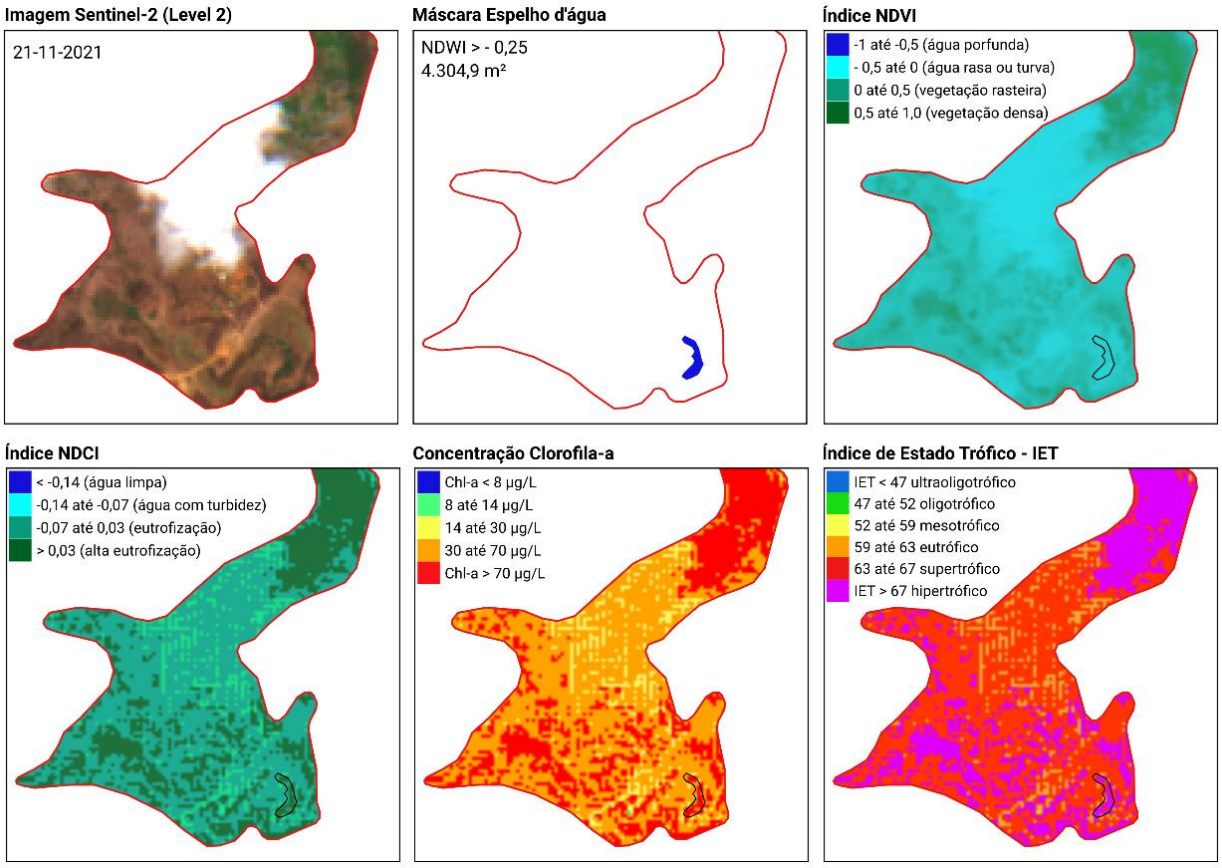
A seguir temos a Figura 13 e 14 apresentado a análise da data 17-05-2021 e 21-11-2021.

Figura 13 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 17-05-2021.



Fonte: Autor (2025).

Figura 14 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 21-11-2021.



Fonte: Autor (2025).

A avaliação do Índice de Estado Trófico (IET) do Reservatório de Mateus Vieira, por meio de imagens Sentinel-2 referentes a 17 de maio e 21 de novembro de 2021, oferece uma compreensão aprofundada da dinâmica hidrológica e biológica do ecossistema aquático.

Em 17 de maio de 2021 (Figura 13), a máscara do espelho d'água, derivada do NDWI, indicava uma área de 42.462,1 m². Essa dimensão representa uma redução notável em comparação com períodos anteriores (2019 e 2020), sugerindo uma diminuição do volume hídrico. Tal decréscimo pode ser atribuído a fatores climáticos, como a redução da precipitação e o aumento da evaporação. Conforme Bueno *et al*. (2023), a variação dos corpos hídricos no semiárido brasileiro é intrinsecamente ligada ao balanço hídrico, sendo influenciada pela irregularidade das chuvas e pela elevada taxa de evapotranspiração. O NDVI, por sua vez, revelava uma presença significativa de vegetação circundante ao reservatório, com predominância de áreas verdes que denotam vegetação densa. A presença de vegetação marginal pode desempenhar um papel crucial na retenção de sedimentos e na mitigação da erosão, contribuindo para a estabilização dos nutrientes na área ripária (BUENO *et al*., 2023).

O NDCI para 17 de maio de 2021 apresentava uma intensificação de áreas em verde escuro, indicando uma maior propensão à eutrofização, associada ao acúmulo de nutrientes e à baixa renovação da água. Bueno *et al*. (2023) salientam que reservatórios com alta taxa de retenção hídrica e baixa circulação tendem a exibir maiores concentrações de fósforo e nitrogênio, o que favorece o crescimento excessivo de algas e cianobactérias. Essa condição era corroborada pela alta concentração de Clorofila-a, com extensas porções em vermelho, indicando valores superiores a 60 µg/L. Este cenário sugere um avanço do processo de floração de algas, potencialmente impactado pela redução do espelho d'água e pelo aumento da temperatura da água. Comparando-se com as imagens de 2018, 2019 e 2020, observava-se uma tendência de intensificação da condição trófica do reservatório. Em 2018, a presença de áreas com menor concentração de Clorofila-a e menor índice de eutrofização era mais evidente, enquanto em 2019 e 2020 houve um aumento gradual da degradação da qualidade da água, com destaque para a expansão de áreas com índices elevados de eutrofização e hipereutrofização. Bueno *et al*. (2023) demonstram que a evolução da eutrofização em reservatórios nordestinos pode estar diretamente ligada às mudanças climáticas e ao aumento do uso do solo para atividades agropecuárias, resultando em maior aporte de sedimentos e nutrientes para os corpos hídricos. O IET para esta data confirmava essa tendência, com grande parte do reservatório classificada como hipereutrófica, superando as condições observadas nos anos anteriores.

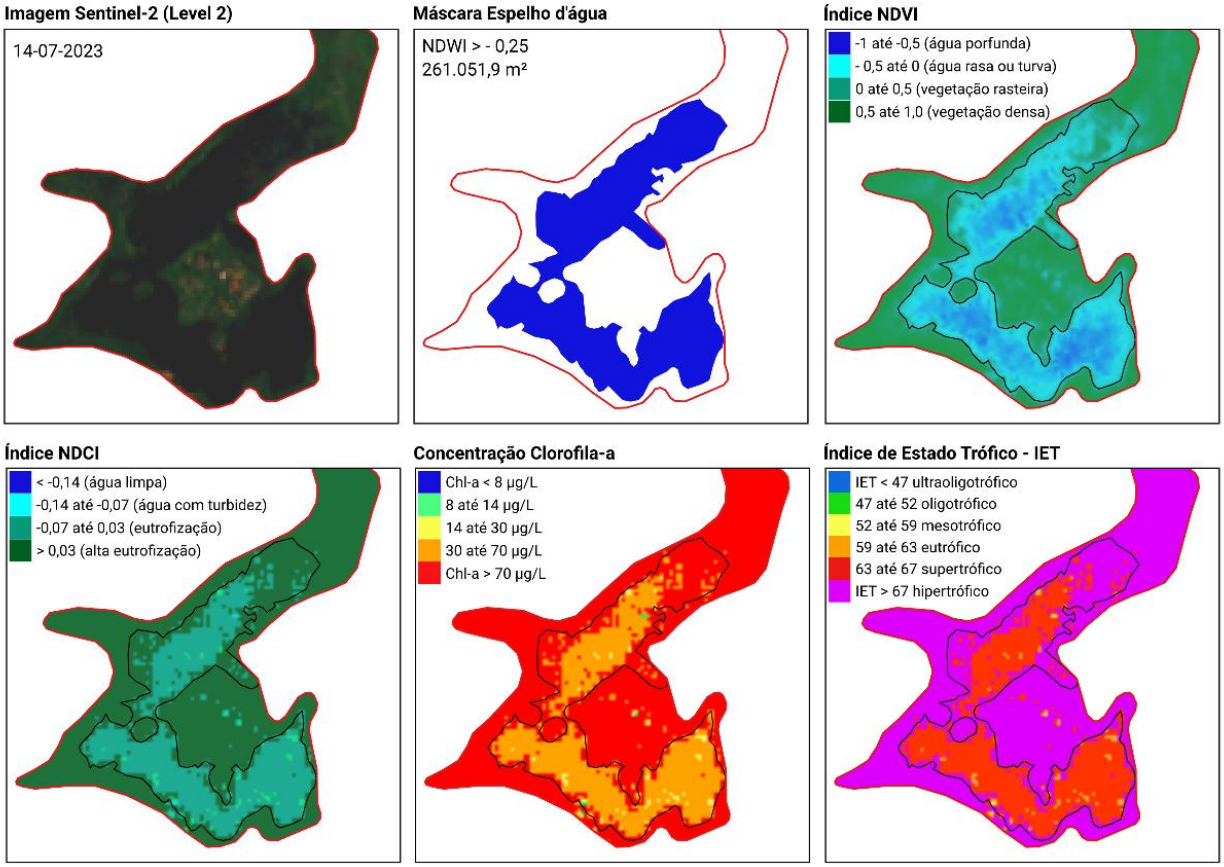
Em 21 de novembro de 2021 (Figura 14), a situação do reservatório de Mateus Vieira demonstrava uma acentuada diminuição na área do espelho d'água, registrando apenas 4.304,9 m². Essa retração volumétrica, em comparação com 17 de maio de 2021, sugere um período de seca prolongada ou intensificação do uso da água. O NDVI continuava a indicar a presença de vegetação nas margens, mas a redução drástica do volume hídrico alterava a dinâmica do ecossistema. O NDCI, por sua vez, revelava uma predominância de áreas com alta turbidez e eutrofização, com extensas porções em verde escuro e até mesmo em tons de marrom, indicando um agravamento da qualidade da água. A concentração de Clorofila-a para esta data exibia valores predominantemente elevados, com a maior parte do reservatório em vermelho (>70 µg/L), sinalizando uma floração algal intensa e generalizada. Consequentemente, o IET para 21 de novembro de 2021 mostrava uma predominância esmagadora do estado hipereutrófico, com a quase totalidade do corpo d"água atingindo os níveis mais críticos de degradação trófica.

Em resumo, a análise temporal entre 17 de maio de 2021 e 21 de novembro de 2021 revela uma progressão alarmante na degradação do Reservatório de Mateus Vieira. A diminuição contínua do volume hídrico, aliada ao aumento das concentrações de Clorofila-a e dos índices de eutrofização, culminou em um estado hipereutrófico generalizado. Esses

resultados apontam para a necessidade premente de estratégias de gestão ambiental, considerando o impacto da variação do espelho d'água, o aporte de nutrientes e a ausência de práticas de controle da poluição difusa, que contribuem para o agravamento da degradação da qualidade da água no reservatório Mateus Vieira. Tais achados reforçam a urgência de intervenções para mitigar os impactos e restaurar a qualidade da água do reservatório.

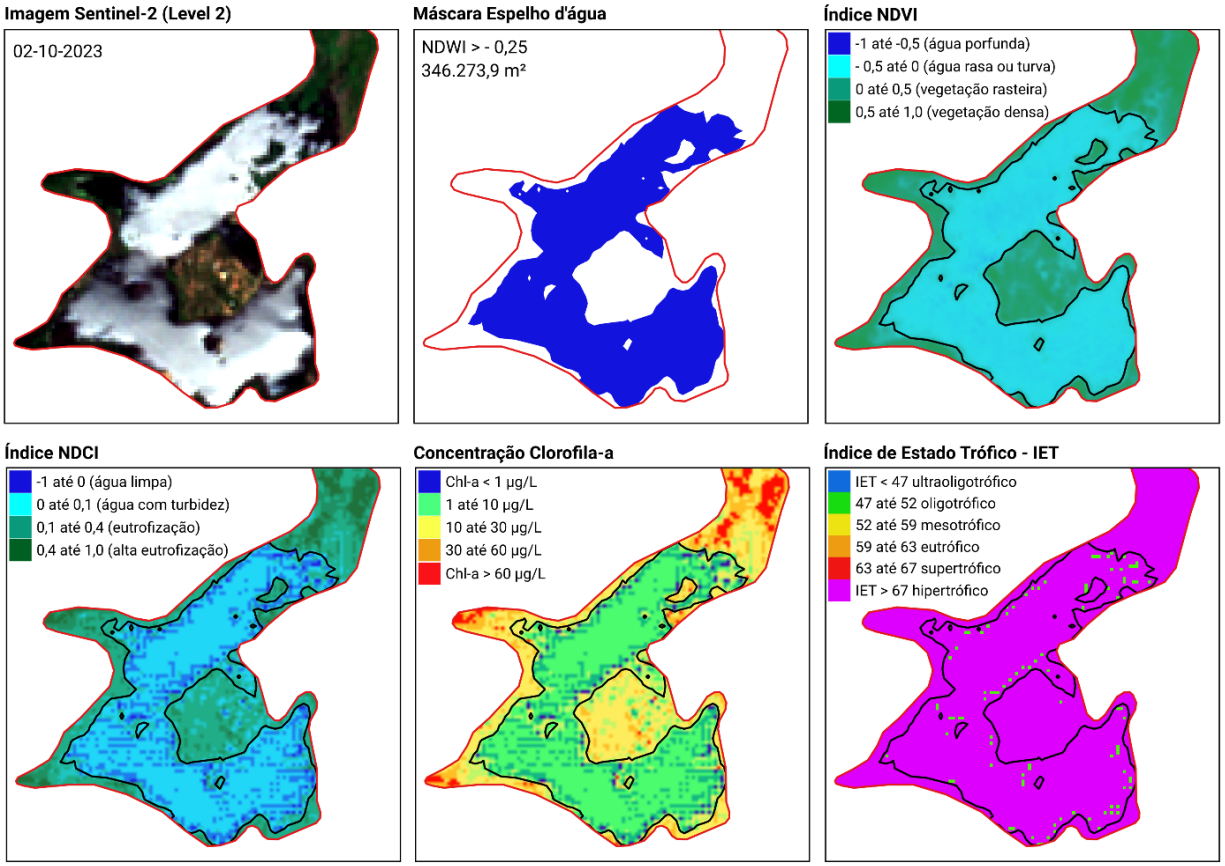
Posteriormente temos a Figura 15 e 16 apresentado a análise das datas 14-07-2023 e 02-10-2023.

Figura 15 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 14-07-2023.



Fonte: Autor (2025).

Figura 16 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 02-10-2023.



Fonte: Autor (2025).

Inicialmente, em 14 de julho de 2023 (Figura 15), a máscara do espelho d'água, derivada do NDWI, indicava uma área de 261.051,9 m². Esta dimensão representa uma recuperação notável em comparação com períodos anteriores, especialmente 2021, quando o espelho d'água era substancialmente menor. Tal aumento pode ser associado a eventos climáticos, como o incremento das precipitações, resultando em maior recarga hídrica. Estudos anteriores demonstram que a variação do nível da água influencia diretamente a qualidade hídrica, principalmente em reservatórios inseridos em regiões semiáridas, onde a oscilação de volume pode impactar a concentração de nutrientes e sedimentos em suspensão (AVIZ, 2021). Adicionalmente, a ampliação do espelho d'água pode diluir temporariamente concentrações elevadas de poluentes, embora a eutrofização acumulada continue a representar um desafio na manutenção da qualidade da água (SILVA *et al.*, 2023).

No que tange ao NDVI, observa-se a presença de vegetação esparsa ao redor do reservatório, com áreas de vegetação rasteira e densa. Essa cobertura vegetal marginal pode contribuir para o controle da erosão e, consequentemente, para a redução do aporte de

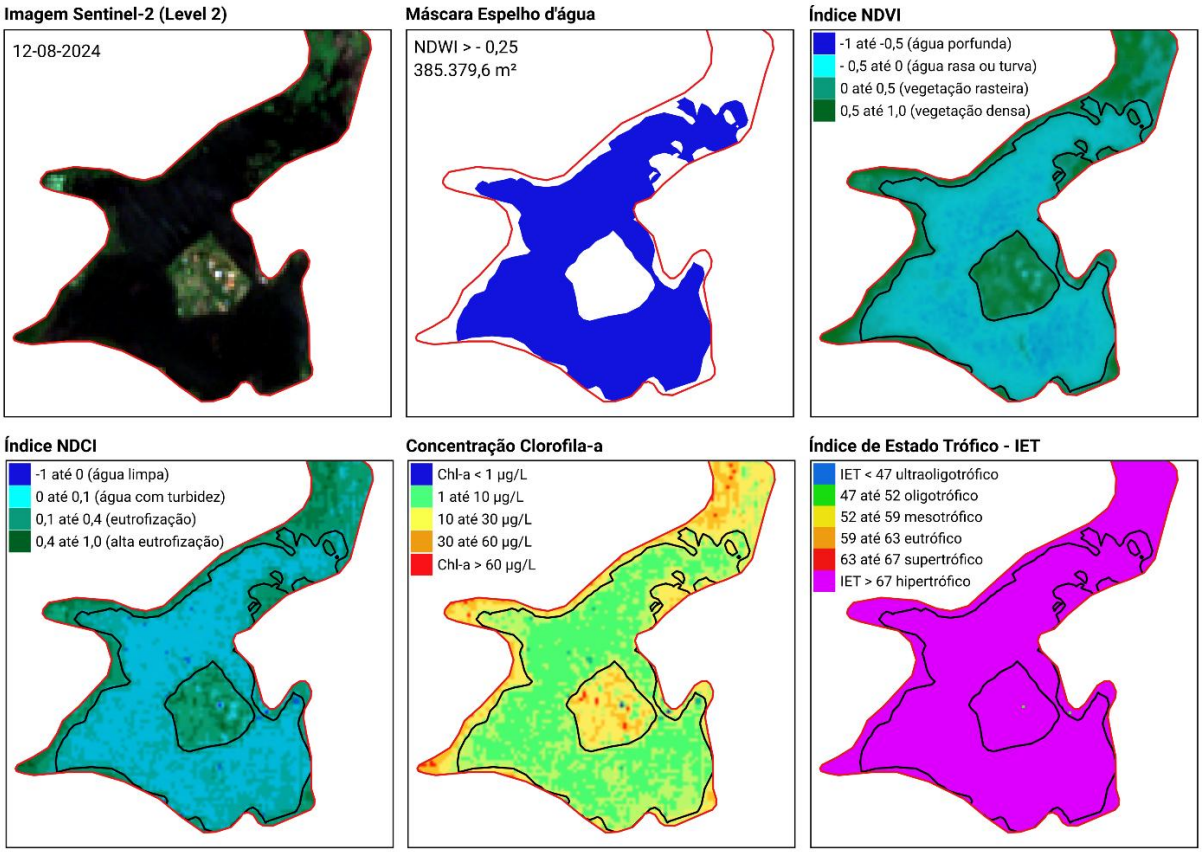
sedimentos. A vegetação ripária desempenha um papel crucial na proteção dos corpos hídricos, minimizando a entrada de material particulado e nutrientes oriundos de escoamento superficial, um fator relevante para a mitigação da eutrofização. Comparações com outros estudos indicam que a conversão do uso da terra, especialmente devido a atividades agrícolas intensivas, pode agravar o aporte de nutrientes, intensificando processos eutróficos (AVIZ, 2021). O NDCI, por sua vez, indica uma predominância de áreas com valores entre 0 e 0,1, classificadas como águas com turbidez moderada, enquanto regiões localizadas apresentam indícios de eutrofização, refletidos em áreas com valores superiores a 0,4.

Prosseguindo para 02 de outubro de 2023 (Figura 16), a área do espelho d'água do Reservatório Mateus Vieira expandiu-se ainda mais, atingindo 346.273,9 m². Este incremento volumétrico, em relação a julho de 2023, reforça a tendência de recuperação hídrica. Contudo, a análise do padrão do Índice de Estado Trófico ao longo das imagens anteriores revela uma tendência persistente de eutrofização avançada. Desde 2018, o reservatório apresenta áreas extensas classificadas como hipereutróficas (IET > 67), com um agravamento progressivo até 2021, quando o espelho d'água se encontrava reduzido e concentrava altas cargas de nutrientes. Em 2023, apesar da diluição proporcionada pelo aumento do volume de água, o IET permanece crítico, sugerindo que o acúmulo histórico de nutrientes e a baixa renovação da água mantêm o estado trófico elevado. Esse comportamento está em conformidade com estudos que indicam que, em reservatórios tropicais, o processo de eutrofização pode persistir por longos períodos mesmo após a introdução de medidas de controle (AVIZ, 2021). A resiliência desse processo destaca a importância de abordagens integradas de gestão hídrica, que incluam estratégias de controle do aporte de nutrientes e remoção de biomassa algal.

Em suma, o impacto cumulativo das atividades antrópicas, o aporte contínuo de nutrientes e a resiliência dos processos de eutrofização destacam a necessidade premente de intervenções na gestão ambiental da bacia hidrográfica do reservatório. Isso inclui o controle da poluição difusa e o monitoramento contínuo da qualidade da água. Medidas como a implementação de programas de recuperação da mata ciliar e a adoção de técnicas sustentáveis de uso do solo podem mitigar os efeitos da eutrofização, como já demonstrado em iniciativas bem-sucedidas em outros reservatórios brasileiros (AVIZ, 2021).

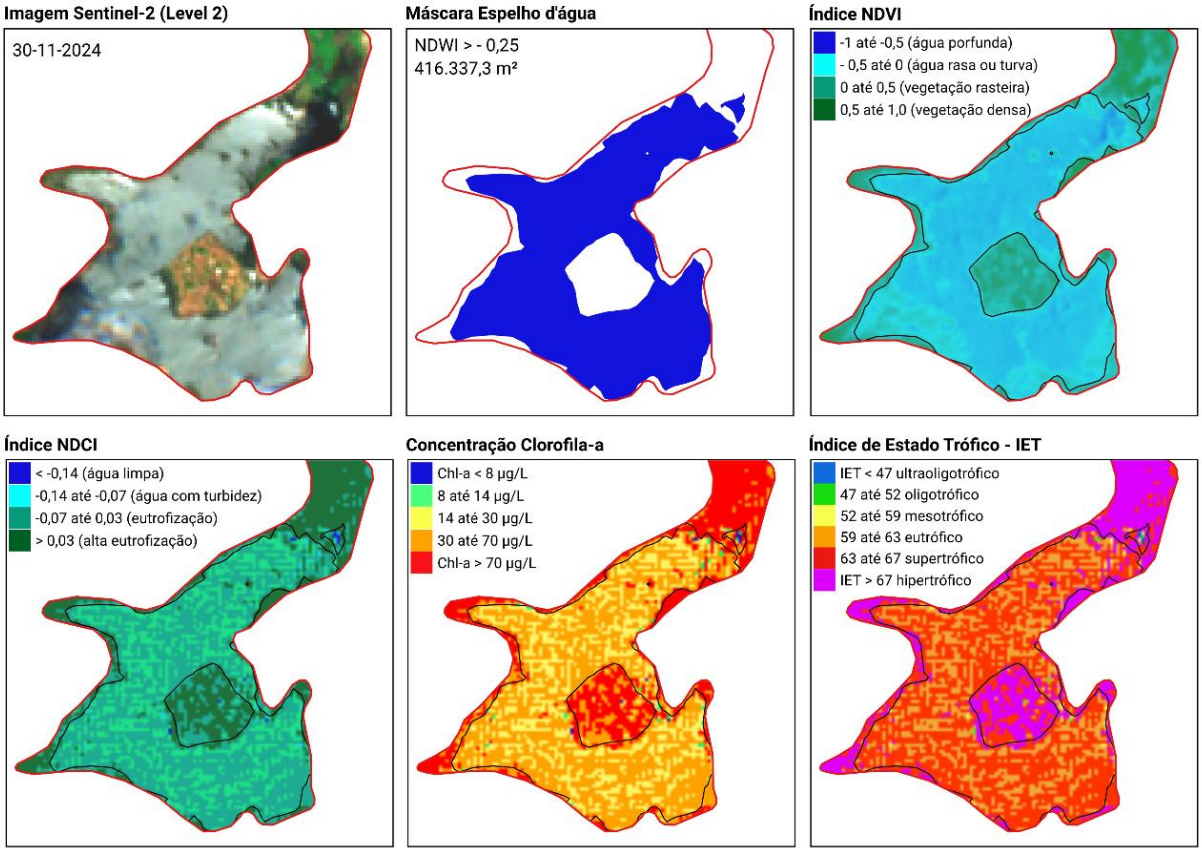
Consequente temos a Figura 17 e 18 apresentado a análise das datas 12-08-2024 e 30-11-2024.

Figura 17 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 12-08-2024.



Fonte: Autor (2025).

Figura 18 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 30-11-2024.



Fonte: Autor (2025).

Em 12 de agosto de 2024 (Figura 17), o Reservatório Mateus Vieira exibia um espelho d'água expandido, alcançando 385.379,6 m², o maior registro até então. Este volume sugere um evento de recarga hídrica intensa, possivelmente associado a um período chuvoso ou a alterações no regime hidrológico local. A ampliação da superfície aquática pode influenciar diretamente a diluição de nutrientes e a dinâmica da eutrofização, conforme indicado por estudos que correlacionam a variabilidade sazonal da água com a qualidade ambiental de corpos hídricos (LOBO *et al*., 2023). Contudo, a recarga pode, paradoxalmente, promover a ressuspensão de sedimentos, intensificando processos internos de liberação de fósforo, um fenômeno já descrito em reservatórios tropicais sujeitos a oscilações sazonais (SOUZA *et al*., 2021). O NDVI, neste contexto, apontava para uma predominância de vegetação rasteira nas imediações do reservatório (valores entre 0 e 0,5), com áreas de vegetação densa (>0,5) restritas. Tal padrão de cobertura vegetal impacta diretamente o aporte de matéria orgânica e fósforo reativo, elementos cruciais para a intensificação da produção primária e a proliferação fitoplanctônica, contribuindo para a manutenção do reservatório em estado de hipereutrofização

(SOUZA *et al*., 2021). A ausência de zonas ripárias eficazes agrava a vulnerabilidade do reservatório a processos de degradação, pois diminui sua capacidade de reter sedimentos e nutrientes provenientes das áreas adjacentes (LOBO *et al*., 2020). O NDCI, por sua vez, apresentava valores entre 0 e 0,1, caracterizando águas com turbidez moderada, enquanto algumas regiões exibiam valores acima de 0,1, indicando zonas de eutrofização. A concentração de Clorofila-a mostrava uma distribuição mais homogênea, com predominância de valores entre 10 e 30 µg/L, e uma redução nas áreas críticas com concentrações acima de 60 µg/L em comparação com imagens anteriores. Este quadro, embora com uma leve melhora, reforça a necessidade de medidas mitigadoras, dada a potencial liberação de cianotoxinas por cianobactérias, impactando ecossistemas aquáticos e a segurança hídrica (SANTOS *et al*., 2021).

Posteriormente, em 30 de novembro de 2024 (Figura 18), o Reservatório Mateus Vieira mantinha um espelho d'água expressivo, com 416.337,3 m², indicando a persistência de condições de alta recarga hídrica. O NDVI continuava a refletir a predominância de vegetação rasteira, com áreas de água rasa ou turva. O NDCI, neste período, variava entre -0,14 e -0,07, caracterizando água com turbidez, e entre -0,07 e 0,03, indicando eutrofização. A concentração de Clorofila-a exibia valores predominantemente entre 14 e 30 µg/L, com áreas significativas atingindo 30 a 70 µg/L e até mesmo acima de 70 µg/L, sinalizando uma intensificação da biomassa algal em relação a agosto de 2024.

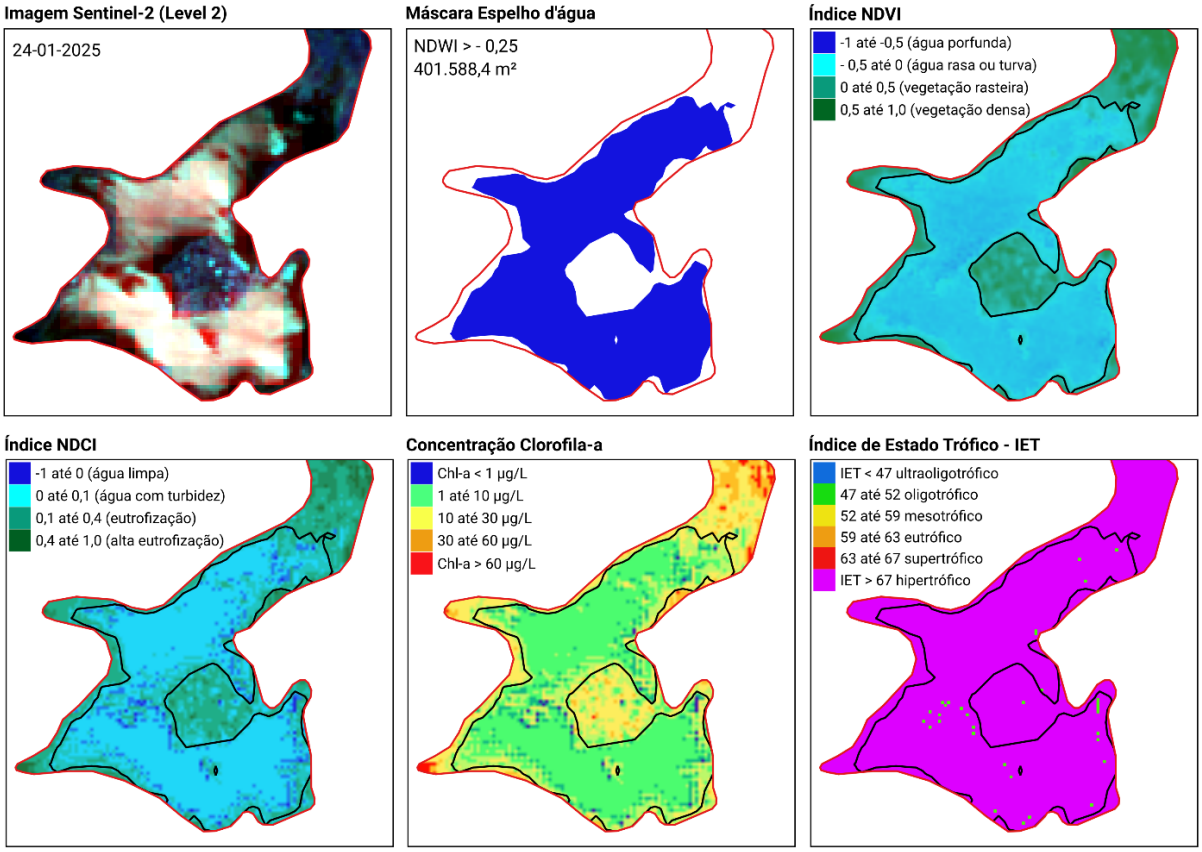
Ao correlacionar esses dados com os limites estabelecidos para o IET, observa-se que o estado trófico do reservatório permanece elevado, com grande parte classificada na categoria hipereutrófica (IET > 67). Este padrão reflete um processo de eutrofização crônico, que demonstra resiliência às variações sazonais de volume hídrico. Mesmo com o aumento do espelho d'água, que poderia sugerir uma diluição dos nutrientes, o acúmulo de matéria orgânica e a liberação interna de nutrientes continuam a alimentar o ciclo eutrófico. Situações análogas foram documentadas em outros reservatórios tropicais, onde a liberação de fósforo do sedimento durante períodos de recarga contribuiu para a manutenção do estado trófico elevado (SOUZA et al., 2021). Embora tenha havido uma leve redução nas áreas de Clorofila-a em concentrações extremas em agosto de 2024, essa melhora não foi suficiente para alterar significativamente o IET. Os valores de NDCI, que se mantêm acima de -0,07 em várias regiões, corroboram a persistência da eutrofização.

Em síntese, o impacto cumulativo das atividades antrópicas, o aporte contínuo de nutrientes e a resiliência dos processos de eutrofização ressaltam a necessidade premente de intervenções na gestão ambiental da bacia hidrográfica do reservatório. Isso abrange o controle

da poluição difusa e o monitoramento contínuo da qualidade da água. Medidas como a implementação de programas de recuperação da mata ciliar e a adoção de técnicas sustentáveis de uso do solo podem mitigar os efeitos da eutrofização, conforme já demonstrado em iniciativas bem-sucedidas em outros reservatórios brasileiros (AVIZ, 2021).

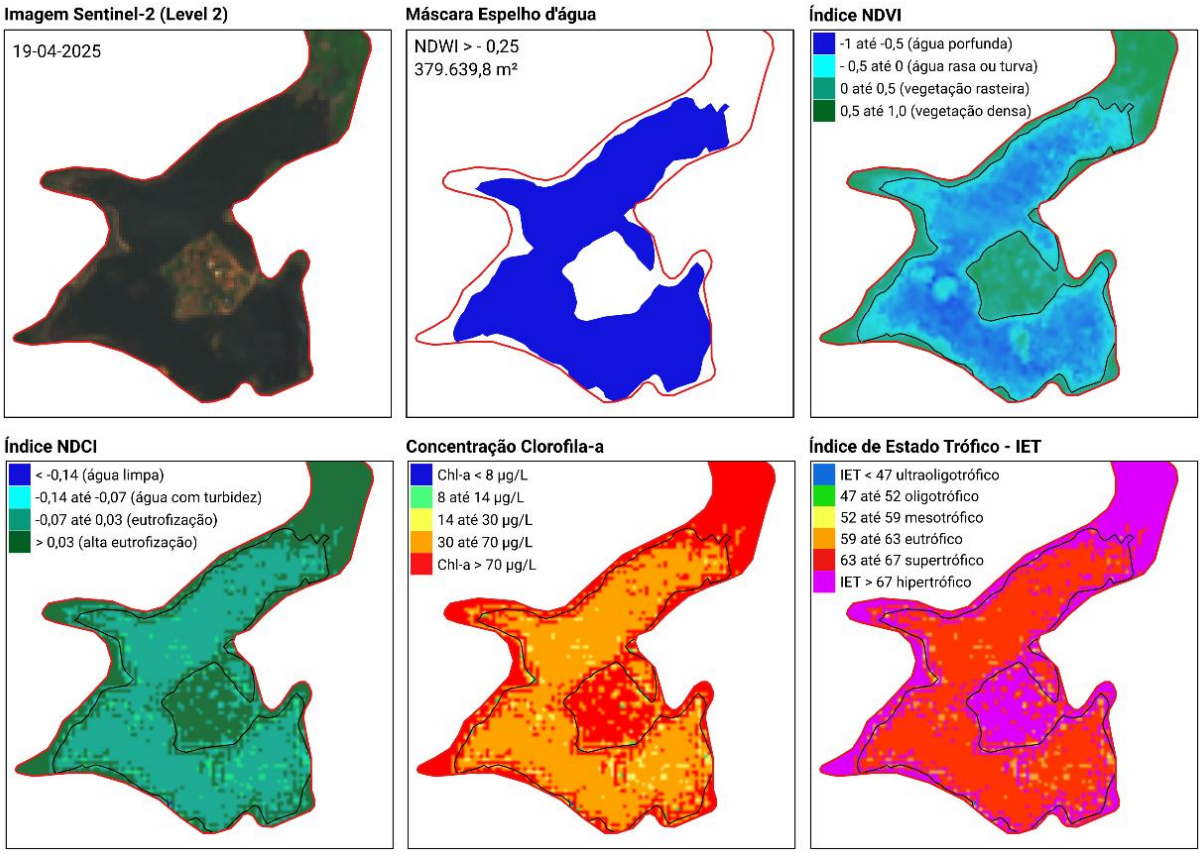
Por fim, as Figuras 19 e 20 apresentam a últimas datas analisadas.

Figura 19 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 24-01-2025.



Fonte: Autor (2025).

Figura 20 - Análise do IET do reservatório de Mateus Vieira através da imagem do Sentinel-2 para o dia 19-04-2025.



Fonte: Autor (2025).

Em 24 de janeiro de 2025 (Figura 19), o Reservatório Mateus Vieira apresentava um espelho d'água com 401.588,4 m². Esta expansão notável, em comparação com períodos anteriores, pode ser atribuída a fatores climáticos sazonais ou a intervenções na gestão hídrica local. A variação da área do reservatório está diretamente associada ao balanço hídrico da bacia, sendo influenciada por precipitações, evapotranspiração e processos de infiltração do solo (NASCIMENTO *et al*., 2024). Assim, o aumento da área alagada pode indicar um ciclo hidrológico mais favorável, impactando temporariamente a qualidade da água por meio da diluição de poluentes e nutrientes acumulados nos períodos de estiagem. O NDVI, por sua vez, destacava uma predominância de vegetação rasteira (valores entre 0 e 0,5), enquanto zonas com vegetação densa (>0,5) eram restritas, indicando alterações na cobertura vegetal que potencialmente impactam os processos ecológicos aquáticos e a qualidade da água. A presença de vegetação marginal desempenha um papel essencial no controle do aporte de sedimentos e nutrientes para os corpos hídricos, podendo contribuir para a redução dos processos de eutrofização (NASCIMENTO *et al*., 2024). O NDCI variava de -1 a 1, com predominância de áreas indicativas de água limpa (valores próximos a -1), contrastando com zonas que

apresentavam sinais claros de eutrofização (valores superiores a 0,1). A concentração de Clorofila-a registrava níveis elevados, com extensas áreas variando entre 10 e 60 µg/L, e pontos críticos que ultrapassavam 60 µg/L. O IET evidenciava uma condição hipereutrófica em várias regiões do reservatório, com valores superiores a 67, denotando uma acentuada deterioração da qualidade da água. A comparação com a Tabela 1 demonstrava uma correlação direta entre o aumento do NDCI e da Clorofila-a com estados tróficos mais críticos, especialmente em áreas de maior acúmulo de nutrientes. De acordo com Silva *et al*. (2023), a persistência de elevadas concentrações de clorofila-a pode estar relacionada ao acúmulo de fósforo na coluna d'água, promovendo a intensificação do estado trófico mesmo em períodos de aumento do espelho d'água.

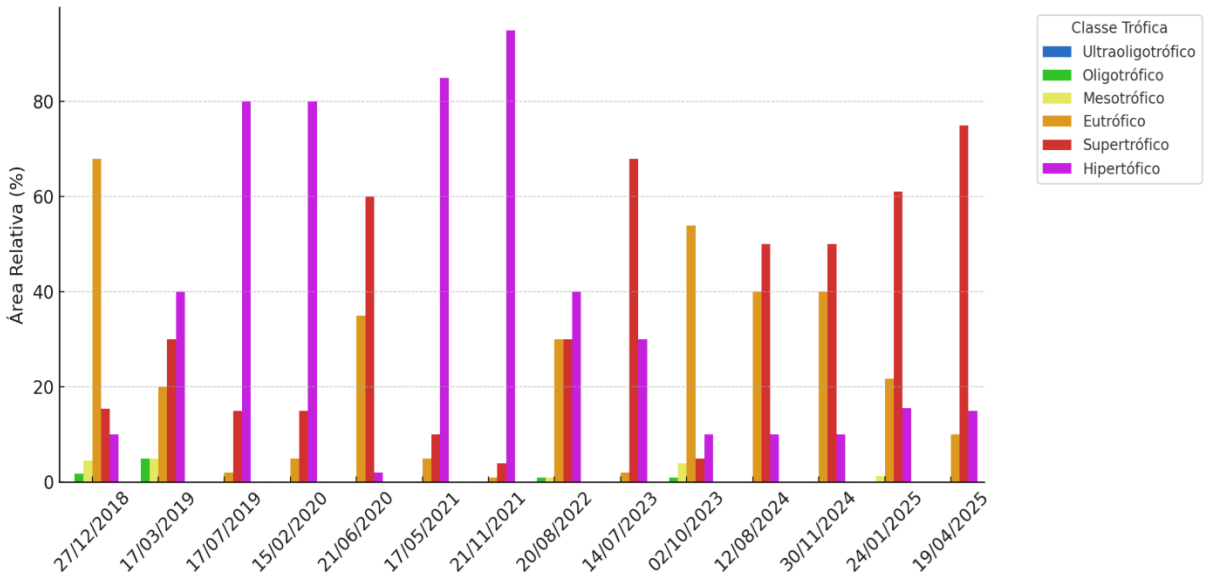
Prosseguindo para 19 de abril de 2025 (Figura 20), o Reservatório Mateus Vieira apresentava um espelho d'água com 379.639,8 m², indicando uma leve retração em relação a janeiro de 2025, mas ainda mantendo um volume considerável. O NDVI continuava a refletir a predominância de vegetação rasteira, com áreas de água rasa ou turva. O NDCI, neste período, variava entre -0,14 e -0,07, caracterizando água com turbidez, e entre -0,07 e 0,03, indicando eutrofização. A concentração de Clorofila-a exibia valores predominantemente entre 14 e 30 µg/L, com áreas significativas atingindo 30 a 70 µg/L e até mesmo acima de 70 µg/L, sinalizando uma intensificação da biomassa algal em relação a janeiro de 2025. Consequentemente, o IET para 19 de abril de 2025 mostrava uma predominância esmagadora do estado hipereutrófico, com a quase totalidade do corpo d'água atingindo os níveis mais críticos de degradação trófica.

Ao analisar o panorama geral do comportamento do reservatório ao longo dos anos (2018-2025), percebe-se uma tendência de agravamento progressivo da eutrofização. Inicialmente, em 2018 e 2019, o reservatório apresentava condições mais favoráveis, com menor incidência de eutrofização e volumes hídricos variados. Contudo, a partir de 2020, mesmo com a expansão do espelho d'água em alguns períodos, houve um aumento consistente nos índices de NDCI e Clorofila-a, culminando em estados hipereutróficos generalizados em 2021 e persistindo até 2025. A recuperação volumétrica observada em 2023 e 2024, embora significativa, não foi suficiente para reverter o quadro de eutrofização crônica. Isso sugere que o acúmulo histórico de nutrientes nos sedimentos e a liberação interna de fósforo continuam a alimentar o ciclo eutrófico, mesmo em períodos de maior diluição. A resiliência desse processo destaca a importância de abordagens integradas de gestão hídrica, que incluam estratégias de controle do aporte de nutrientes e remoção de biomassa algal.

Em suma, o impacto cumulativo das atividades antrópicas, o aporte contínuo de nutrientes e a resiliência dos processos de eutrofização ressaltam a necessidade premente de intervenções na gestão ambiental da bacia hidrográfica do reservatório. Isso abrange o controle da poluição difusa e o monitoramento contínuo da qualidade da água. Medidas como a implementação de programas de recuperação da mata ciliar e a adoção de técnicas sustentáveis de uso do solo podem mitigar os efeitos da eutrofização, conforme já demonstrado em iniciativas bem-sucedidas em outros reservatórios brasileiros (AVIZ, 2021; LOBO *et al*., 2023; NASCIMENTO *et al*., 2024; SANTOS *et al*., 2021; SILVA *et al*., 2023; SOUZA *et al*., 2021).

O Quadro 3 abaixo ilustra a variação da área absoluta das diferentes classes tróficas ao longo do tempo, fornecendo uma perspectiva quantitativa da evolução do estado trófico do Reservatório Mateus Vieira entre 2018 e 2025. O gráfico destaca as classes tróficas ultraoligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, supereutrófico e hipereutrófico, permitindo a visualização das flutuações na extensão das áreas afetadas por diferentes níveis de eutrofização.

Quadro 3 - Área absoluta categorizada pelo IET do Reservatório Mateus Vieira durante o período de estudo.



Fonte: Autor (2025).

O Quadro 3, que apresenta a área relativa categorizada pelo Índice de Estado Trófico (IET) do Reservatório de Mateus Vieira ao longo do período de estudo, revela um panorama complexo e, em grande parte, preocupante. Observa-se um crescimento significativo das áreas

classificadas como supereutrófico e hipereutrófico nos últimos anos, especialmente em 2024 e 2025. A categoria hipereutrófica, em particular, atinge picos expressivos, superando 80% da área relativa em 2021 e mantendo-se em patamares elevados em 2024 e 2025. Este aumento expressivo está em consonância com os dados observados nas imagens de sensoriamento remoto analisadas anteriormente, que evidenciam um processo de degradação contínuo da qualidade da água.

A intensificação dessas categorias tróficas indica que o reservatório Mateus Vieira segue um ciclo de retroalimentação eutrófica. Nesse ciclo, o acúmulo de nutrientes sedimentares e a liberação de fósforo interno sustentam altas concentrações de fitoplâncton, mesmo em períodos de recarga hídrica. Este padrão já foi identificado em outros reservatórios tropicais, onde o balanço entre carga externa e interna de nutrientes determina a persistência do processo de eutrofização (NASCIMENTO *et al*., 2024).

Ao correlacionar os dados do Quadro 3 com as variações do espelho d'água observadas nas imagens de sensoriamento remoto, nota-se que, mesmo com o aumento do volume hídrico em determinados períodos (como em 2023 e 2024), a ampliação das áreas hipereutróficas persiste. Isso sugere que o aporte hídrico não foi suficiente para reverter os efeitos da sobrecarga de nutrientes. Embora em alguns reservatórios tropicais o aumento do volume hídrico possa reduzir momentaneamente a concentração de fósforo e nitrogênio dissolvidos, no Reservatório Mateus Vieira, a tendência observada no Quadro 3 indica que a liberação interna de nutrientes e o tempo de residência da água desempenham um papel crucial na manutenção da eutrofização (NASCIMENTO *et al*., 2024). Isso reforça a hipótese de que a carga interna de fósforo acumulada ao longo dos anos contribui para a persistência do estado trófico elevado, mesmo diante de variações sazonais na precipitação e recarga (SILVA *et al*., 2023).

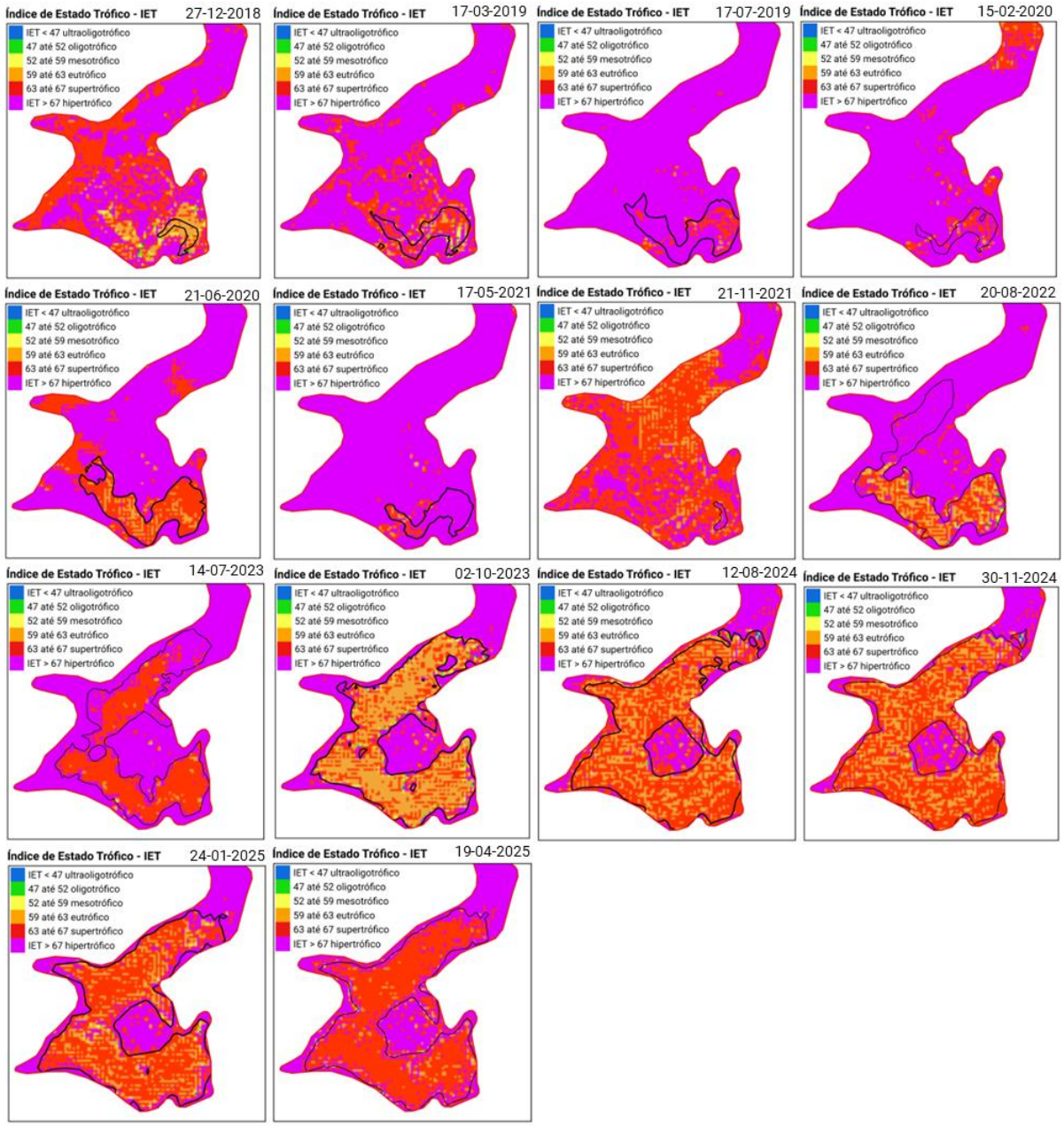
O panorama geral do comportamento do reservatório desde 2018, conforme evidenciado pela série temporal de imagens e pelo Quadro 3, é de um agravamento progressivo do estado trófico. Inicialmente, em 2018 e início de 2019, embora já houvesse indícios de eutrofização, as classes tróficas menos impactadas (ultraoligotrófico, oligotrófico e mesotrófico) ainda representavam uma parcela considerável da área. Contudo, a partir de meados de 2019 e, de forma mais acentuada, em 2020 e 2021, as áreas hipereutróficas e supereutróficas dominaram o reservatório, atingindo seus maiores percentuais. Mesmo com a recuperação volumétrica observada em 2023 e 2024, que resultou em uma leve diminuição da área hipereutrófica em alguns pontos, o reservatório não retornou aos níveis tróficos iniciais, mantendo-se predominantemente em um estado de eutrofização avançada. A persistência de elevadas concentrações de Clorofila-a e de índices de NDCI em patamares críticos, mesmo com maior

volume de água, corrobora a influência da carga interna de nutrientes e a resiliência do processo de eutrofização.

Este cenário alarmante ressalta a necessidade de políticas de gestão ambiental mais rigorosas e intervenções direcionadas para a redução das cargas de nutrientes, visando a preservação da integridade ecológica do reservatório. Estratégias como a recuperação de matas ciliares, a implantação de práticas agrícolas sustentáveis e o controle de efluentes urbanos e industriais são essenciais para mitigar os impactos da hipereutrofização e restaurar a qualidade da água (LOBO *et al*., 2023).

Por fim, a Figura 21 apresenta como se comportou o panorama geral IET datas da séria histórica analisada.

Figura 21 - Painel com série histórica do IET do Reservatório Mateus Vieira.



Fonte: Autor (2025).

A análise da Figura 21, que apresenta a série histórica do Índice de Estado Trófico (IET) do Reservatório de Mateus Vieira, revela uma trajetória de deterioração progressiva da qualidade da água no período compreendido entre 2018 e 2025. Inicialmente, nos anos de 2018 e 2019, o corpo hídrico exibia uma heterogeneidade trófica, caracterizada pela presença de áreas mesotróficas e supertrófico. Tais condições indicavam um desequilíbrio nutricional alto e uma instabilidade ambiental. No entanto, essa instabilidade foi gradualmente ampliando, dando

lugar a uma expansão contínua das zonas eutrofizadas ao longo dos anos subsequentes, com uma intensificação notável a partir de 2020.

Este agravamento pode ser atribuído a uma complexa inter-relação de fatores, incluindo o aumento das cargas de nutrientes, tanto de origem interna quanto externa. O escoamento superficial proveniente de atividades agrícolas, o descarte inadequado de efluentes domésticos e industriais, e a redução da taxa de renovação hídrica são elementos que contribuem para a sobrecarga nutricional do ecossistema aquático (NASCIMENTO *et al*., 2024). A partir de 2020, a proliferação das áreas eutrofizadas tornou-se expressiva, culminando no triênio de 2023 a 2025, período em que vastas extensões da superfície do reservatório foram dominadas por estados supereutróficos e hipereutróficos. Esse fenômeno sublinha a resiliência do processo de eutrofização, que é perpetuado pela recirculação de fósforo a partir dos sedimentos e pela persistência de florações de cianobactérias, conforme evidenciado em estudos de monitoramento de outros reservatórios tropicais (LOBO *et al*., 2023).

É imperativo ressaltar que, mesmo em períodos de maior aporte hídrico, a tendência de intensificação da eutrofização não foi revertida, conforme claramente demonstrado na Figura 21. Este fato enfatiza a urgência de intervenções estruturais no manejo da qualidade da água, que transcendam as flutuações sazonais do nível do reservatório. A legislação ambiental vigente, como a Resolução CONAMA nº 357/2005, categoriza águas eutróficas e hipereutróficas como de risco ambiental elevado. Tais condições propiciam a proliferação de florações de cianobactérias, as quais podem liberar toxinas prejudiciais à biota aquática e comprometer a potabilidade da água. Adicionalmente, esses cenários favorecem a depleção do oxigênio dissolvido, podendo induzir episódios de anóxia e mortalidade de organismos aquáticos, com impactos negativos na biodiversidade do reservatório.

Pesquisas recentes indicam que a manutenção do estado hipereutrófico ao longo do tempo está intrinsecamente ligada ao tempo de residência da água e à limitada capacidade de remoção de nutrientes da coluna d'água, estabelecendo um ciclo vicioso de eutrofização e degradação ambiental (SILVA *et al*., 2023). Relatórios de qualidade da água, como os emitidos pela CETESB, consideram valores de clorofila-a superiores a 30 µg/L como indicadores de eutrofização avançada. Nos anos mais recentes analisados na Figura 21, esse limiar foi consistentemente excedido em quase toda a extensão do reservatório, com uma predominância das classes mais elevadas do IET. A persistência desses níveis críticos compromete a utilização da água para abastecimento público, atividades recreativas e irrigação, além de potencializar a formação de florações algais nocivas, fenômeno já documentado em diversos reservatórios brasileiros (NASCIMENTO *et al*., 2024).

Diante desse cenário, torna-se premente a implementação de ações de controle da carga de nutrientes, promovendo o tratamento de efluentes urbanos e industriais, o manejo sustentável da agricultura e a proteção das áreas de recarga hídrica. A adoção de técnicas de bioengenharia e a recuperação da vegetação ripária são estratégias cruciais para reduzir o aporte difuso de nutrientes e minimizar os impactos da eutrofização (LOBO *et al*., 2023).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo empreendeu uma investigação crucial sobre a saúde hídrica do Reservatório de Mateus Vieira, em Taquaritinga do Norte-PE, com o propósito de determinar seu Índice de Estado Trófico (IET) a partir da concentração de clorofila-a, utilizando a avançada capacidade de monitoramento do satélite Sentinel-2.

A metodologia adotada, que se valeu da aquisição e do tratamento de imagens do Sentinel-2 na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), revelou-se uma abordagem robusta, permitindo uma análise detalhada da dinâmica espaço-temporal da clorofila-a ao longo de um período significativo, de 2018 a 2025. O *Normalized Chlorophyll Difference Index* (NDCI) demonstrou uma notável eficácia na identificação precisa das áreas mais impactadas pela presença de clorofila-a, enquanto o *Normalized Vegetation Difference Index* (NDVI) complementou essa visão, oferecendo um panorama valioso sobre a vegetação circundante ao reservatório.

Os achados foram bastante reveladores, indicando níveis preocupantemente elevados de clorofila-a, com picos notáveis em 2019 e 2021, onde as concentrações médias atingiram cerca de 70 μg/L. Este valor, classificado como extremamente alarmante pelos parâmetros da CETESB, sublinha um estágio avançado de eutrofização, com implicações sérias para a qualidade da água e para a integridade dos ecossistemas aquáticos. A análise do IET ao longo da série histórica evidenciou uma variação entre as categorias eutrófico e hipereutrófico, com os momentos mais críticos concentrados entre 2023 e 2025, sinalizando uma deterioração contínua.

A sinergia entre os índices NDCI e NDVI provou ser uma ferramenta poderosa, permitindo uma distinção clara entre as áreas dominadas por fitoplâncton e aquelas com vegetação aquática, o que minimizou distorções na interpretação dos dados espectrais. Embora a validação com dados in situ não tenha sido possível, a coerência da metodologia aplicada com estudos similares confere uma solidez considerável aos resultados apresentados, reforçando a confiabilidade das conclusões.

Em suma, este trabalho não apenas destaca o sensoriamento remoto como uma ferramenta indispensável para o monitoramento da qualidade da água, especialmente em locais de difícil acesso, mas também ressalta a urgência de se implementar políticas de gestão hídrica mais assertivas. É imperativo que haja um foco renovado na redução do aporte de nutrientes e na promoção de práticas ambientais sustentáveis para salvaguardar nossos recursos hídricos para as futuras gerações.

7.1 Recomendações de trabalhos futuros

Com base nos resultados e limitações deste estudo, sugere-se que pesquisas futuras adotem abordagens complementares para aprofundar o entendimento da eutrofização no Reservatório de Mateus Vieira e em outros corpos d'água. Em primeiro lugar, é fundamental integrar dados *in situ* aos modelos de sensoriamento remoto. A coleta de amostras de água para análises laboratoriais de parâmetros como Clorofila-a, fósforo e nitrogênio permitiriam validar e calibrar os dados espectrais, aumentando a precisão das estimativas.

Além disso, recomenda-se ampliar o escopo temporal e espacial das análises. Estender o período de estudo e incluir outros reservatórios da região possibilitaria identificar tendências de longo prazo e comparar a dinâmica da eutrofização em diferentes contextos ambientais. Essa abordagem contribuiria para o desenvolvimento de políticas regionais de gestão de recursos hídricos mais eficazes.

Outro aspecto crucial é a investigação das fontes poluidoras que contribuem para a eutrofização. Estudos futuros devem focar na identificação das principais origens de poluição, como esgoto doméstico, atividades agrícolas e efluentes industriais. A compreensão dessas fontes é essencial para implementar medidas de controle, como tratamento de esgoto, práticas agrícolas sustentáveis e fiscalização ambiental.

Por fim, é importante avaliar os impactos socioeconômicos da eutrofização. A degradação da qualidade da água afeta não apenas o ecossistema aquático, mas também a saúde pública, a economia local e a disponibilidade de água para abastecimento e irrigação. Pesquisas que explorem esses impactos podem fornecer subsídios para políticas públicas que promovam a sustentabilidade e a qualidade de vida das comunidades dependentes do reservatório.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Mohamad; ALAMEDDINE, Ibrahim. Predicting water quality variability in a Mediterranean hypereutrophic monomictic reservoir using Sentinel-2 MSI: the importance of considering model functional form. *Environmental Monitoring and Assessment*, [s.l.], v. 195, n. 8, p. 546-560, 6 jul. 2023. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s10661-023-11456-7. Acesso em: 16 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA) E AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA (AESA). (2022). *Resolução Conjunta ANA/AESA Nº 126, de 26 de julho de 2022*. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/regulacao-e-fiscalizacao/alocacao-de-agua-e-marcos-regulatorios/marcos-regulatorios/marcos-regulatorios-pb. Acesso em: 25 fev. 2025.

AGNOLI, Lara; URQUHART, Erin; GEORGANTZIS, Nikolaos; SCHAEFFER, Blake; SIMMONS, Richard; HOQUE, Bilqis; NEELY, Merrie Beth; NEIL, Claire; OLIVER, Jacques; TYLER, Andrew. Perspectives on user engagement of satellite Earth observation for water quality management. Technological Forecasting And Social Change, [S.L.], v. 189, p. 122357, abr. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122357.

AMORIM, Cihelio Alves; MOURA, Ariadne do Nascimento. Ecological impacts of freshwater algal blooms on water quality, plankton biodiversity, structure, and ecosystem functioning. Science Of The Total Environment, [S.L.], v. 758, p. 143605, mar. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143605.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Panorama das águas: quantidade de água. Brasília, 2020. Disponível em: https://www.ana.gov.br/aguasno-brasil/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua. Acesso em: 24 jan. 2024.

APAC- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/. Acesso em: 14 mar. 2024.

AUBRIOT, Luis et al. Assessing the origin of a massive cyanobacterial bloom in the Río de la Plata (2019): towards an early warning system. *Water Research*, [S. l.], v. 181, p. 115944, ago. 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2020.115944. Acesso em: 5 mai. 2025.

AVIZ, M. D. *Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Água Preta*. Universidade Federal Rural da Amazônia, 2021.

BARBOSA, Cláudio Clemente Faria. Princípios físicos do sensoriamento remoto aquático. In: BARBOSA, Cláudio Clemente Faria; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; MARTINS, Vinícius Simões. Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. p. 23-54.

BARROSO, Gabriela Rodrigues; PINTO, Carolina Cristiane; GOMES, Lenora Nunes Ludolf; OLIVEIRA, Sílvia Corrêa. Assessment of water quality based on statistical analysis of physical-chemical, biomonitoring and land use data: manso river supply reservoir. Science Of The Total Environment, [S.L.], v. 912, p. 169554, fev. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169554.

BAZAANAH, Prosper; MOTHAPO, Raesibe Adelaide. Sustainability of drinking water and sanitation delivery systems in rural communities of the Lepelle Nkumpi Local Municipality, South Africa. Environment, Development and Sustainability, [s.l.], v. 26, n. 6, p. 14223-14255, 11 abr. 2023. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: https://link.springer.com/. Acesso em: 16 nov. 2024.

BHATTACHARJEE, Rajarshi; GUPTA, Arpit; DAS, Nilendu; AGNIHOTRI, Ashwani Kumar; OHRI, Anurag; GAUR, Shishir. Analysis of alga bloom intensification in mid-Ganga river, India, using satellite data and neural network techniques. Environmental Monitoring and Assessment, [s.l.], v. 194, n. 8, p. 547, 1 jul. 2022. Springer Science and Business Media LLC.

BISSON, Kristin Marie; WERDELL, Patricia Joanne; CHASE, Alison Paige; KRAMER, Stephen John; CAEL, Ben Benjamin; BOSS, Emmanuel; MCKINNA, Lachlan Ian Walker; BEHRENFELD, Michael John. Informing ocean color inversion products by seeding with ancillary observations. Optics Express, [s.l.], v. 31, n. 24, p. 40557, 15 nov. 2023. Optica Publishing Group. Disponível em: https://opg.optica.org/oe/. Acesso em: 16 nov. 2024.

BRASIL. Constituição (1934). Decreto Nacional nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código de Águas. Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Planalto, 10 jul. 1934. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643compilado.htm. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRASIL. Constituição (2005). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a Classificação dos Corpos de Água e Diretrizes Ambientais. Brasilia, DF, 2005.

BRASIL. Constituição (2020). Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Brasília, DF, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Lei que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1997.

BUENO, Laura Martins; LOBO, Felipe de Lucia; SANTANA, Eduardo Luceiro; SIMÕES, Aline Machado; MOURA, Bruna Bohm; LIMA, Gustavo Borges; DUARTE, Ingridy. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO ESTADO DO CEARÁ POR IMAGENS DE SATÉLITE SUBSIDIADO PELO ALGAEMAP. Abrhidro, Brasilia, v. 1, n. 9, p. 1-10, nov. 2023. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15051. Acesso em: 05 jan. 2025.

BUMA, Wilson Godfrey; LEE, Seungwon. Evaluation of Sentinel-2 and Landsat 8 images for estimating chlorophyll-a concentrations in Lake Chad, Africa. Remote Sensing, [s.l.], v. 12, n. 15, p. 2437, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/journal/remotesensing. Acesso em: 11 nov. 2024.

CAMPOS, J. C. B.; LEITE, E. P. F. Procedimentos para análise e validação de atributos da qualidade da água. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 3, p. 559-573, 2019.

CARDONA-MESA, Ahmed Alejandro; VÁSQUEZ-SALAZAR, Rubén Darío; GÓMEZ, Luis; TRAVIESO-GONZÁLEZ, Carlos M.; GARAVITO-GONZÁLEZ, Andrés F.; VÁSQUEZ-

CANO, Esteban; DÍAZ-PAZ, Jean Pierre. Dataset of Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 RGB-NDVI imagery. Data In Brief, [S.L.], v. 57, p. 111160, dez. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.dib.2024.111160.

CAVENDER-BARES, Jeannine; SCHNEIDER, Fabian Daniel; SANTOS, Maria João; ARMSTRONG, Amanda; CARNAVAL, Ana; DAHLIN, Kyla Michelle; FATOYINBO, Lola; HURTT, George Christopher; SCHIMEL, David; TOWNSEND, Philip Andrew. Integrating remote sensing with ecology and evolution to advance biodiversity conservation. Nature Ecology & Evolution, [s.l.], v. 6, n. 5, p. 506-519, 24 mar. 2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41559-022-01682-1. Acesso em: 16 nov. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2020. Publicações e Relatórios. Apêndice D - Índices de Qualidade das Águas. Disponível: https://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wp-content/uploads/sites/12/2020/09/Apendice-D-Indices-de-Qualidade-das-Aguas.pdf. Acesso: 21 nov. 2020.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE –. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Brasília: CONAMA, 2011. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/conama. Acesso em: 25 mai. 2023.

CPRH – AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (Pernambuco). Disponível em: https://www2.cprh.pe.gov.br/. Acesso em: 24 jan. 2024.

CUI, Yuhuan; YAN, Zhongnan; WANG, Jie; HAO, Shuang; LIU, Youcun. Deep learning–based remote sensing estimation of water transparency in shallow lakes by combining Landsat 8 and Sentinel-2 images. *Environmental Science and Pollution Research*, [s.l.], v. 29, n. 3, p. 4401-4413, 18 ago. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: https://link.springer.com/journal/11356. Acesso em: 14 ago. 2024.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Satélites de monitoramento: missões Sentinel. Campinas, SP: EMBRAPA, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel. Acesso em: 18 mar. 2024.

ESA – AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA. Copernicus: Sentinela Online. 2023. Disponível em: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home. Acesso em: 15 mar. 2023.

ESTOQUE, Ronald C.; JOHNSON, Brian Alan; DASGUPTA, Rajarshi; GAO, Yan; MATSUURA, Toshiya; TOMA, Takeshi; HIRATA, Yasumasa; LASCO, Rodel D.. Rethinking forest monitoring for more meaningful global forest landscape change assessments. Journal Of Environmental Management, [S.L.], v. 317, p. 115478, set. 2022. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115478.

FALCIONI, Renan; MORIWAKI, Thaise; ANTUNES, Werner Camargos; NANNI, Marcos Rafael. Rapid Quantification Method for Yield, Calorimetric Energy and Chlorophyll a Fluorescence Parameters in Nicotiana tabacum L. Using Vis-NIR-SWIR Hyperspectroscopy. Plants, [S.L.], v. 11, n. 18, p. 2406, 15 set. 2022. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/plants11182406.

GILBERT, Patricia M. Eutrophication, harmful algae and biodiversity — Challenging paradigms in a world of complex nutrient changes. Marine Pollution Bulletin, [S. l.], v. 124, n. 2, p. 591-606, nov. 2017.

GUIMARÃES, Bruna Monallize Duarte Moura Lima; NETO, Iran Eduardo. Chlorophyll-a prediction in tropical reservoirs as a function of hydroclimatic variability and water quality. Environmental Science And Pollution Research, [S.L.], v. 30, n. 39, p. 91028-91045, 19 jul. 2023. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-28826-w.

GUIMARÃES, Bruna Monallize Duarte Moura; NETO, Iran Eduardo Lima. Chlorophyll-a prediction in tropical reservoirs as a function of hydroclimatic variability and water quality. Environmental Science And Pollution Research, [S.L.], v. 30, n. 39, p. 91028-91045, 19 jul. 2023. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-28826-w.

HE, Canhui; SONG, Zhengyong. Terahertz graphene metasurfaces for cross-polarized deflection, focusing, and orbital angular momentum. Optics Express, [S.L.], v. 30, n. 14, p. 25498, 29 jun. 2022. Optica Publishing Group. http://dx.doi.org/10.1364/oe.462330.

HOUSKEEPER, Henry Francis; HOOKER, Stanford Benton; CAVANAUGH, Kyle Christopher. Spectrally simplified approach for leveraging legacy geostationary oceanic observations. *Applied Optics*, [s.l.], v. 61, n. 27, p. 7966, 15 set. 2022. Optica Publishing Group. Disponível em: https://opg.optica.org/ao. Acesso em: 02 fev. 2024.

IBANHEZ, João Sérgio Pinto; AREVALO, Eliana; KELLY, Timothy; PAPASPYROU, Stergios; ROCHA, Cláudia; NICOLAIDOU, Alexia. Unraveling the dispersion and environmental impact of anthropogenic discharges in transitional water ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 216, p. 204-217, 2019.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. . ÁGUA POTÁVEL E SANEAMENTO. 2024. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html#:~:text=Garantir%20disponibilidade%20e%20manejo%20sustent%C3%A1vel%20da%20%C3%A1gua%20e%20saneamento%20para%20todos&text=At%C3%A9%202030%2C%20alcan%C3%A7ar%20o%20acesso,pot%C3%A1vel%20e%20segura%20para%20todos.. Acesso em: 20 abr. 2024.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. ODS 6 - Água potável e saneamento. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html. Acesso em: 23 jan. 2024.

ISENSTEIN, E. M.; KIM, D.; PARK, M. Ecological Informatics Modeling for multi-temporal cyanobacterial bloom dominance and distributions using landsat imagery. Ecological Informatics, v. 59, n. June 2019, p. 101119, 2020. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101119>.

IZURIETA, Johanna Elizabeth Ayala; DÁVALOS, Andrés Agustín Beltrán; SANTILLÁN, Carlos Arturo Jara; PONCE, Sofía Carolina Godoy; VAN WITTENBERGHE, Shari; VERRELST, Jochem; DELEGIDO, Jesús. Spatial and temporal analysis of water quality in high Andean lakes with Sentinel-2 satellite automatic water products. *Sensors*, [s.l.], v. 23, n. 21, p. 8774, 27 out. 2023. MDPI AG.

JANG, Wonjin; KIM, Jinuk; KIM, Jin Hwi; SHIN, Jae-Ki; CHON, Kangmin; KANG, Eue Tae; PARK, Yongeun; KIM, Seongjoon. Evaluation of Sentinel-2 based chlorophyll-a estimation in a small-scale reservoir: assessing accuracy and availability. *Remote Sensing*, [s.l.], v. 16, n. 2, p. 315, 12 jan. 2024. MDPI AG.

JARGAL, Namsrai; LEE, Ho-Seong; AN, Kwang-Guk. Long-Term Water Quality Patterns in an Estuarine Reservoir and the Functional Changes in Relations of Trophic State Variables Depending on the Construction of Serial Weirs in Upstream Reaches. International Journal Of Environmental Research And Public Health, [S.L.], v. 18, n. 23, p. 12568, 29 nov. 2021. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/ijerph182312568.

JULIEN, Asa R.; NARRON, Caroline R.; MISHRA, Deepak R.. Expanding the flooding in Landsat across tidal systems model to Landsat 5–9 imagery for long-term marsh inundation analysis. Science Of The Total Environment, [S.L.], v. 965, p. 178602, fev. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178602.

KARIMI, Behnaz; HASHEMI, Seyed Hossein; AGHIGHI, Hossein. Application of Landsat-8 and Sentinel-2 for retrieval of chlorophyll-a in a shallow freshwater lake. *Advances in Space Research*, [s.l.], v. 74, n. 1, p. 117-129, jul. 2024. Elsevier BV.

KRISHNARAJ, Ashwitha; HONNASIDDAIAH, Ramesh. Remote sensing and machine learning-based framework for the assessment of spatio-temporal water quality in the Middle Ganga Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, [s.l.], v. 29, n. 43, p. 64939-64958, 27 abr. 2022. Springer Science and Business Media LLC.

KRIVOGUZ, Denis; BONDARENKO, Liudmila; MATVEEVA, Evgenia; ZHILENKOV, Anton; CHERNYI, Sergei; ZINCHENKO, Elena. Machine learning approach for detection of water overgrowth in Azov Sea with Sentinel-2 data. *Journal of Marine Science and Engineering*, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 423, 15 fev. 2023. MDPI AG.

KUHN, Christoph; DE MATOS VALERIO, Andreza; WARD, Nicholas; LOKEN, Luke; SAWAKUCHI, Helena Ometto; KAMPEL, Milton; RICHEY, Jeffrey; STADLER, Philip; CRAWFORD, John; STRIEGL, Robert; VERMOTE, Eric; PAHLEVAN, Nima; BUTMAN, David. Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity. *Remote Sensing of Environment*, v. 224, p. 104-118, 2019.

KUTYłA, Sebastian; KOLADA, Agnieszka; ŁAWNICZAK-MALIńSKA, Agnieszka. Hydromorphological pressure explains the status of macrophytes and phytoplankton less effectively than eutrophication but contributes to water quality deterioration. Water Research, [S.L.], v. 268, p. 122669, jan. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2024.122669.

LAN, Ling; WANG, Yu-Ge; CHEN, Hao-Shuang; GAO, Xu-Rui; WANG, Xie-Kang; YAN, Xu-Feng. Improving on mapping long-term surface water with a novel framework based on the Landsat imagery series. *Journal of Environmental Management*, [s.l.], v. 353, p. 120202, fev. 2024. Elsevier BV.

LENCHA, Semaria Moga; TRÄNCKNER, Jens; DANANTO, Mihret. Assessing the water quality of Lake Hawassa Ethiopia—trophic state and suitability for anthropogenic uses—

applying common water quality indices. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [s.l.], v. 18, n. 17, p. 8904, 24 ago. 2021. MDPI AG.

LI, Xiuqin; LU, Chuqian; ZHANG, Yafeng; ZHAO, Huade; WANG, Juying; LIU, Hongbin; YIN, Kedong. Low dissolved oxygen in the Pearl River estuary in summer: long-term spatio-temporal patterns, trends, and regulating factors. *Marine Pollution Bulletin*, [s.l.], v. 151, p. 110814, fev. 2020. Elsevier BV.

LINS, R. C.; MARQUES, D. M. L. D. M.; FRAGOSO JUNIOR, C. R.; SANTOS, L. D. S.; COSTA, A. M. D.; DOMINGOS, H. V.; MATIAS, R. D. S. Estimativa de Clorofila-a em um complexo estuarino-lagunar utilizando analise derivativa de curvas hiperespectrais. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (19.: 2019 abr.: Santos, SP). Anais. Sao Jose dos Campos: INPE, 2019., 2019.

LOBO, Felipe de Lucia; NAGEL, Gustavo Willy; MACIEL, Daniel Andrade; CARVALHO, Lino Augusto Sander de; MARTINS, Vitor Souza; BARBOSA, Cláudio Clemente Faria; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes. AlgaeMAp: algae bloom monitoring application for inland waters in latin america. Remote Sensing, [S.L.], v. 13, n. 15, p. 2874, 22 jul. 2021. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/rs13152874.

MACIEL, Fernanda Pereira; HAAKONSSON, Signe; LEÓN, Lucía Ponce de; BONILLA, Sylvia; PEDOCCHI, Francisco. Challenges for chlorophyll-a remote sensing in a highly variable turbidity estuary, an implementation with Sentinel-2. *Geocarto International*, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 1, 14 fev. 2023. Informa UK Limited.

MAKWINJA, Rodgers; INAGAKI, Yoshihiko; SAGAWA, Tatsuyuki; OBUBU, John Peter; HABINEZA, Elias; HAAZIYU, Wendy. Monitoring trophic status using in situ data and Sentinel-2 MSI algorithm: lesson from lake malombe, malawi. Environmental Science And Pollution Research, [S.L.], v. 30, n. 11, p. 29755-29772, 23 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-24288-8.

MARKAD, Adinath T.; LANDGE, Asha T.; NAYAK, Binaya B.; INAMDAR, Arun B.; MISHRA, Akhil K.. Trophic state modeling for shallow freshwater reservoir: a new approach. Environmental Monitoring And Assessment, [S.L.], v. 191, n. 9, p. 546, 22 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s10661-019-7740-5.

MATHEW, Jose; SINGH, Archana; GOPINATH, Anu. Nutrient concentrations and distribution of phytoplankton pigments in recently deposited sediments of a positive tropical estuary. Marine Pollution Bulletin, [S.L.], v. 168, p. 112454, jul. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112454.

MATSUSHITA, B.; YANG, W.; YU, G.; OYAMA, Y.; YOSHIMURA, K.; FUKUSHIMA, T. A hybrid algorithm for estimating the chlorophyll-a concentration across different trophic states in Asian inland waters. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, v. 102, p. 28-37, 2015.

MATTHEWS, Mark William; KRAVITZ, Jeremy; PEASE, Joshua; GENSEMER, Stephen. Determining the spectral requirements for cyanobacteria detection for the CyanoSat hyperspectral imager with machine learning. *Sensors*, [s.l.], v. 23, n. 18, p. 7800, 11 set. 2023. MDPI AG.

MELLO, Karin de; TANIWAKI, Rodrigo Haruo; PAULA, Fábio Roberto de; VALENTE, Raul Almeida; RANDHIR, Timothy Owen; MACEDO, Dirceu Rezende; LEAL, Carolina Gonçalves; RODRIGUES, Carlos Benevenuto; HUGHES, Robert Mark. Multiscale land use impacts on water quality: assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 270, n. jun., 2020.

MISHRA, Sachidananda; MISHRA, Deepak R.. Normalized difference chlorophyll index: a novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sensing Of Environment, [S.L.], v. 117, p. 394-406, fev. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016.

MOFIJUR, Mohammad; HASAN, Mahmudul; AHMED, Shams Forruque; DJAVANROODI, Farzin; FATTAH, Islam Mohamed Rahman; SILITONGA, Ambarita Sitorus; KALAM, M. Abdul; ZHOU, John L.; KHAN, Tareq Md Yunus. Advances in identifying and managing emerging contaminants in aquatic ecosystems: analytical approaches, toxicity assessment, transformation pathways, environmental fate, and remediation strategies. *Environmental Pollution*, [s.l.], v. 341, p. 122889, jan. 2024. Elsevier BV.

MUSYOKA, Francis Kilundu; STRAUSS, Peter; ZHAO, Guangju; STROHMEIER, Stefan; MUTUA, Benedict Mwavu; KLIK, Andreas. Evaluating the impacts of sustainable land management practices on water quality in an agricultural catchment in Lower Austria using SWAT. Environmental Monitoring And Assessment, [S.L.], v. 195, n. 4, p. 1025, 25 mar. 2023. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s10661-023-11079-y.

NASCIMENTO, Kleberson Rodrigo do; MELLO, Kelvyn Ferreira de; BURDA, Naomi Anaue; SILVA, Patricia Godoi da; OLIVEIRA, Diego Santos de; SILVA, Jefferson Luiz Gonçalves da; MAIA, Brenda Rutchay da Silva; OLIVEIRA, Letícia Silva de. MONITORAMENTO E GESTÃO AMBIENTAL DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU: utilizando sensoriamento remoto para a detecção de plantas aquáticas. Revista Foco, [S.L.], v. 17, n. 9, p. 6137, 11 set. 2024. South Florida Publishing LLC. http://dx.doi.org/10.54751/revistafoco.v17n9-063.

NEIL, Craig; SPYRAKOS, Evangelos; HUNTER, Philip David; TYLER, Andrew Neil. A global approach for chlorophyll-a retrieval across optically complex inland waters based on optical water types. *Remote Sensing of Environment*, v. 229, p. 159-178, 2019.

NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes. Sistemas aquáticos continentais: definição e características. In: BARBOSA, Cláudio Clemente Faria; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; MARTINS, Vinícius Simões. *Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações*. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. p. 9-22.

OLIVEIRA, Mariana Souza; SANTOS, Renata Fabiana de Oliveira. O controle de fósforo como estratégia para a prevenção da eutrofização. *Ecologia e Conservação*, v. 16, n. 2, p. 123-138, 2020.

ORTEGA, Samuel; FABELO, Himar; IAKOVIDIS, Dimitris; KOULAOUZIDIS, Anastasios; CALLICO, Gustavo. Use of Hyperspectral/Multispectral Imaging in Gastroenterology. Shedding Some–Different–Light into the Dark. Journal Of Clinical Medicine, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 36, 1 jan. 2019. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/jcm8010036.

PAHLEVAN, Nima; SMITH, Brandon; SCHALLES, John; BINDING, Caren; CAO, Zhigang; MA, Ronghua; ALIKAS, Krista; KANGRO, Kersti; GURLIN, Daniela; HÀ, Nguyễn. Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: a machine-learning approach. Remote Sensing Of Environment, [S.L.], v. 240, p. 111604, abr. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.11160

PARAÍBA. (2022). *Plano Estadual de Recursos Hídricos, RF-04 - proposições das ações do plano*. João Pessoa: Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, 384 p.

PEPPA, Maria; VASILAKOS, Christos; KAVROUDAKIS, Dimitris. Eutrophication monitoring for Lake Pamvotis, Greece, using Sentinel-2 data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 143, 29 fev. 2020. MDPI AG.

PEREIRA, Alessandro Rhadamek Alves; LOPES, João Batista; ESPINDOLA, Giovana Mira de; SILVA, Carlos Ernando da; SOARES, Rafael Diego Barbosa; PICANÇO JUNIOR, Péricles Luiz. Detection and mapping of eutrophication and aquatic plants in a river in the Northeast region of Brazil using Sentinel-2 data. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [s.l.], v. 15, n. 1, p. 546-560, 23 mar. 2022.

PERNAMBUCO, Tribunal de Contas do Estado de. Conheça mais sobre Taquaritinga do Norte. 2024. Disponível em: https://tomeconta.tcepe.tc.br/dados/Municipio!municipioSelecionado?municipio.nome=Taquaritinga%20do%20Norte&municipio.codigo=P153#:~:text=al%C3%A9m%20do%20turismo.-,Turismo,todo%20caf%C3%A9%20produzido%20no%20Estado.. Acesso em: 28 dez. 2024.

PIZANI, Fernanda Mara Coelho. Modelos de turbidez, transparência e concentração de clorofila no reservatório de Três Marias a partir dos dados espectrais dos satélites Sentinel-2. 2024. 274 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

POMERLEAU, Patrick; ROYER, Alain; LANGLOIS, Alexandre; CLICHE, Patrick; COURTEMANCHE, Bruno; MADORE, Jean-Benoît; PICARD, Ghislain; LEFEBVRE, Éric. Low cost and compact FMCW 24 GHz radar applications for snowpack and ice thickness measurements. *Sensors*, [s.l.], v. 20, n. 14, p. 3909, 14 jul. 2020. MDPI AG.

POMPÊO, M.; MOSCHINI-CARLOS, V.; BITENCOURT, M. D.; SÓRIA-PERPINYÀ, X.; VICENTE, E.; DELEGIDO, J. (2021). “Water quality assessment using Sentinel-2 imagery with estimates of chlorophyll a, Secchi disk depth, and Cyanobacteria cell number: the cantareira system reservoirs (São Paulo, Brazil)”. *Environmental Science And Pollution Research*, 28(26), pp. 34990-35011.

PRASANTH, B. R. Vishnu; SIVAKUMAR, R.; RAMARAJ, M.. A Study on Algae Bloom Pigment in the Eutrophic Lake Using Bio-Optical Modelling: hyperspectral remote sensing approach. Bulletin Of Environmental Contamination And Toxicology, [S.L.], v. 109, n. 6, p. 962-968, 2 abr. 2022. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s00128-022-03511-9.

RADIN, Carolina; SORIA-PERPINÀ, Xavier; DELEGIDO, Jesús. Estudio multitemporal de calidad del água del embalse de Sitjar (Castelló, España) utilizando imágenes Sentinel-2. *Revista Española de Teledetección*, v. 56, p. 117-130, 2020.

ROCHA, Gustavo Leite; SILVA, João Carlos. Impactos da eutrofização em ecossistemas aquáticos e estratégias de mitigação. *Ciências do Ambiente*, v. 18, n. 3, p. 79-92, 2020.

RODRIGUES, Vivian Fernanda Wiesenhutter. Estimativa da concentração de clorofila-a no reservatório de Salto Grande em Americana/SP a partir de imagens de satélite. 2022. 89 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2022.

SALLS, Wilson B.; SCHAEFFER, Blake A.; PAHLEVAN, Nima; COFFER, Megan M.; SEEGERS, Bridget N.; WERDELL, P. Jeremy; FERRIBY, Hannah; STUMPF, Richard P.; BINDING, Caren E.; KEITH, Darryl J.. Expanding the Application of Sentinel-2 Chlorophyll Monitoring across United States Lakes. Remote Sensing, [S.L.], v. 16, n. 11, p. 1977, 30 maio 2024. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/rs16111977.

SENT, Gabriel; BIGUINO, Beatrice; FAVARETO, Lucas; CRUZ, João; SÁ, Carolina; DOGLIOTTI, Andrea Ivonne; PALMA, Carla; BROTAS, Vanda; BRITO, Ana Catarina. Deriving water quality parameters using Sentinel-2 imagery: a case study in the Sado estuary, Portugal. *Remote Sensing*, v. 13, n. 5, p. 1043, 2021.

SEVERIANO, Juliana dos Santos; LIMA, Edlayne Rayanara Pontes de; LUCENA-SILVA, Daniely de; ROCHA, Dayrla Kelly Gomes; VERÍSSIMO, Maria Eduarda Santana; FIGUEIREDO, Bruno Renaly Souza; BARBOSA, José Etham de Lucena; MOLOZZI, Joseline. The role of bioturbation triggered by benthic macroinvertebrates in the effectiveness of the Floc & Lock technique in mitigating eutrophication. *Water Research*, [s.l.], v. 246, p. 120691, nov. 2023. Elsevier BV.

SHI, Xuming; GU, Lingjia; JIANG, Tao; ZHENG, Xingming; DONG, Wen; TAO, Zui. Retrieval of chlorophyll-a concentrations using Sentinel-2 MSI imagery in Lake Chagan based on assessments with machine learning models. *Remote Sensing*, [s.l.], v. 14, n. 19, p. 4924, 1 out. 2022. MDPI AG.

SILVA, M. B. M. da; COSTA, L. D. A.; LIMA, A. M. de S.; OLIVEIRA, D. S. de; VEIGA, M. E. B. da. *Espacialização do nível de clorofila-a em reservatórios utilizando imagens Sentinel-2: Aplicação no reservatório Poções, PB*. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023.

SODHI, Taranjeet Singh; DAHIPHALE, Pravin; ARORA, Mohit. Assessment of water dynamics and water quality parameters over Gobind Sagar Reservoir, India, based on high-resolution remote sensing approach. *Water Conservation Science and Engineering*, [s.l.], v. 9, n. 2, p. 37, 28 jun. 2024. Springer Science and Business Media LLC.

SOUZA, Ana Paula Damasceno; TEODORO, Paulo Eduardo; TEODORO, Larissa Pereira Ribeiro; TAVEIRA, Aline Cordeiro; OLIVEIRA-JÚNIOR, José Francisco de; DELLA-SILVA, João Lucas; BAIO, Fabio Henrique Rojo; LIMA, Mendelson; SILVA JUNIOR, Carlos Antonio da. Application of remote sensing in environmental impact assessment: a case study of dam rupture in Brumadinho, Minas Gerais, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, [s.l.], v. 193, n. 9, p. 606, 28 ago. 2021. Springer Science and Business Media LLC.

SOUZA, Anderson P.; OLIVEIRA, Bruno A.; ANDRADE, Mauren L.; STARLING, Maria Clara V.M.; PEREIRA, Alexandre H.; MAILLARD, Philippe; NOGUEIRA, Keiller; SANTOS, Jefersson A. dos; AMORIM, Camila C.. Integrating remote sensing and machine learning to detect turbidity anomalies in hydroelectric reservoirs. Science Of The Total Environment,

[S.L.], v. 902, p. 165964, dez. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165964.

SUN, Lin; YU, Huajun; SUN, Mingxing; WANG, Yutao. Coupled impacts of climate and land use changes on regional ecosystem services. Journal Of Environmental Management, [S.L.], v. 326, p. 116753, jan. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116753.

TAO, Yuqiang; YU, Jing. Modification of trophic level index with the contribution of macrophyte and its usage to classify trophic state of shallow lakes. Environmental Science And Pollution Research, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 9630-9641, 9 jan. 2024. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-024-31849-6.

VILLALOBOS, L. L. Gracia; WILLIAMS, G. N.; GLEMBOCKI, N. G.; PISONI, J. P.; NOCERA, A. C.; FERRANDO, A. Phytoplanktonic community and bio-optical properties in coastal waters of an Argentinian Patagonian gulf. *Marine Pollution Bulletin*, [s.l.], v. 194, p. 115388, set. 2023. Elsevier BV.

WAN, Yuting; MA, Ailong; ZHANG, Liangpei; ZHONG, Yanfei. Multiobjective sine cosine algorithm for remote sensing image spatial-spectral clustering. *IEEE Transactions on Cybernetics*, [s.l.], v. 52, n. 10, p. 11172-11186, out. 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

WANG, Hanghang; WANG, Jie; CUI, Yuhuan; YAN, Shijiang. Consistency of suspended particulate matter concentration in turbid water retrieved from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI sensors. *Sensors*, [s.l.], v. 21, n. 5, p. 1662, 28 fev. 2021. MDPI AG.

WANG, Weijia; SHI, Kun; ZHANG, Yibo; LI, Na; SUN, Xiao; ZHANG, Dong; ZHANG, Yunlin; QIN, Boqiang; ZHU, Guangwei. A ground-based remote sensing system for high-frequency and real-time monitoring of phytoplankton blooms. *Journal of Hazardous Materials*, [s.l.], v. 439, p. 129623, out. 2022. Elsevier BV.

WATANABE, F.; ALCANTARA, E.; BERNARDO, N.; DE ANDRADE, C.; GOMES, A. C.; DO CARMO, A.; RODRIGUES, T.; ROTTA, L. H. Mapping the chlorophyll-a horizontal gradient in a cascading reservoirs system using MSI Sentinel-2A images. Advances in Space Research, v. 64, n. 3, p. 581-590, 2019.

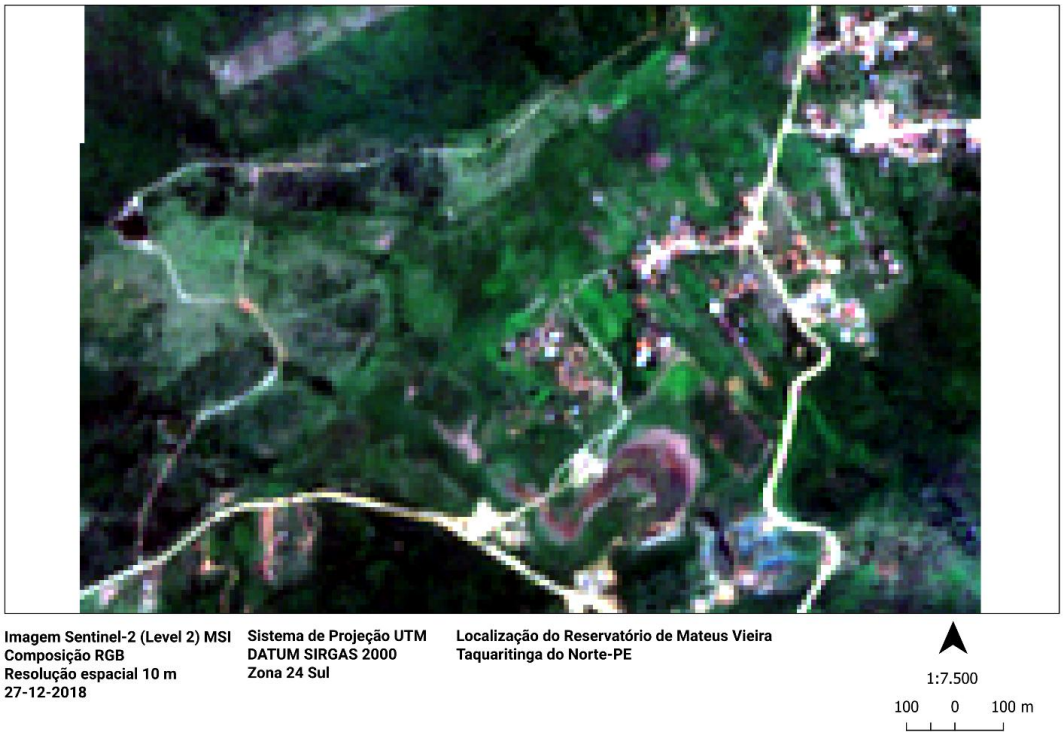
XIAO, Rushui; GAO, Guandong; YANG, Dezhou; SU, Ying; DING, Yang; BI, Rong; YAN, Shibo; YIN, Baoshu; LIANG, Shengkang; LV, Xianqing. The impact of extreme precipitation on physical and biogeochemical processes regarding nutrient dynamics in a semi-closed bay. *Science of the Total Environment*, [s.l.], v. 906, p. 167599, jan. 2024. Elsevier BV.

ZHAO, Desong; HUANG, Jue; LI, Zhengmao; YU, Guangyue; SHEN, Huagang. Dynamic monitoring and analysis of chlorophyll-a concentrations in global lakes using Sentinel-2 images in Google Earth Engine. *Science of the Total Environment*, [s.l.], v. 912, p. 169152, fev. 2024. Elsevier BV.

ZHU, Baoyu; LV, Qunbo; YANG, Yuanbo; SUI, Xuefu; ZHANG, Yu; TANG, Yinhui; TAN, Zheng. Blind deblurring of remote-sensing single images based on feature alignment. *Sensors*, [s.l.], v. 22, n. 20, p. 7894, 17 out. 2022. MDPI AG.

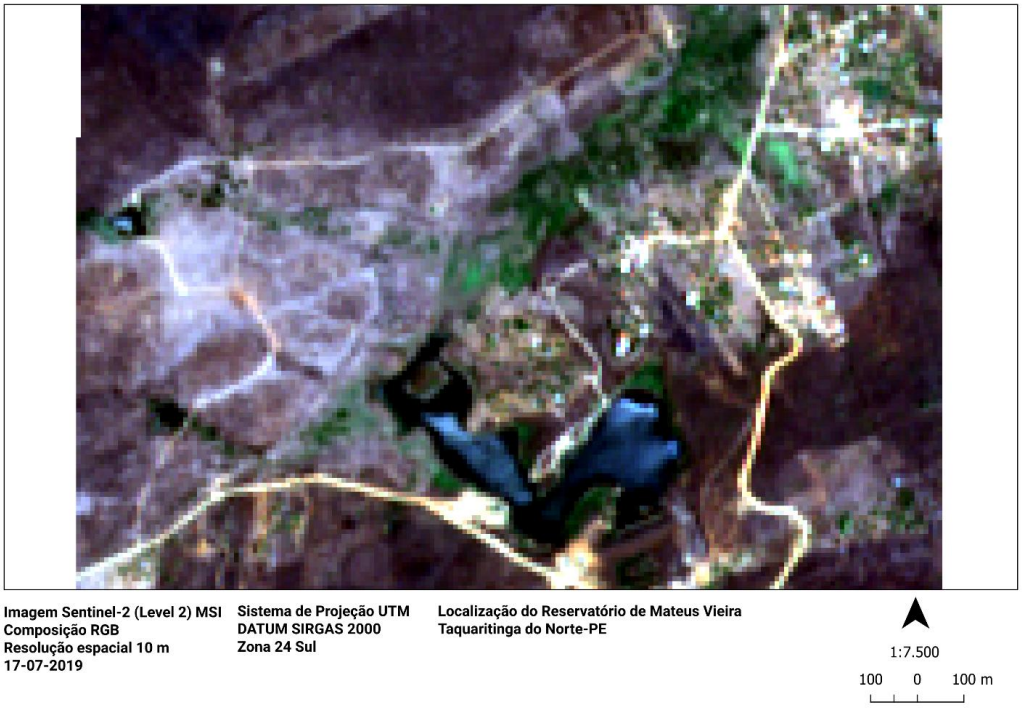
ANEXOS

ANEXO A – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 27-12-2018.



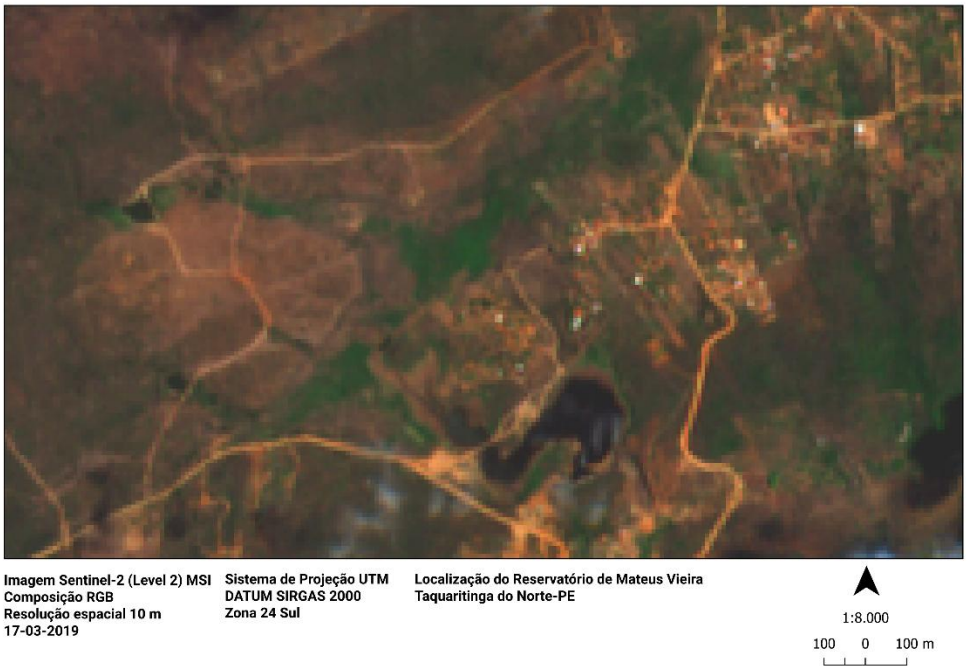
Fonte: GEE (2025).

ANEXO B – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 17-07-2019.



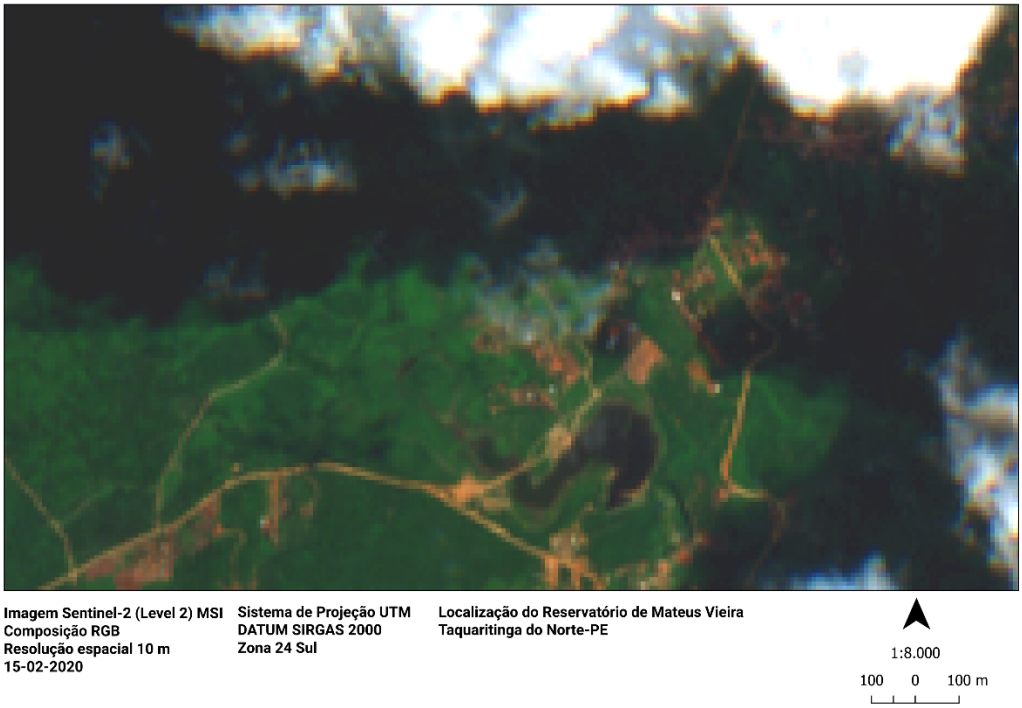
Fonte: GEE (2025).

ANEXO C – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 17-03-2019.



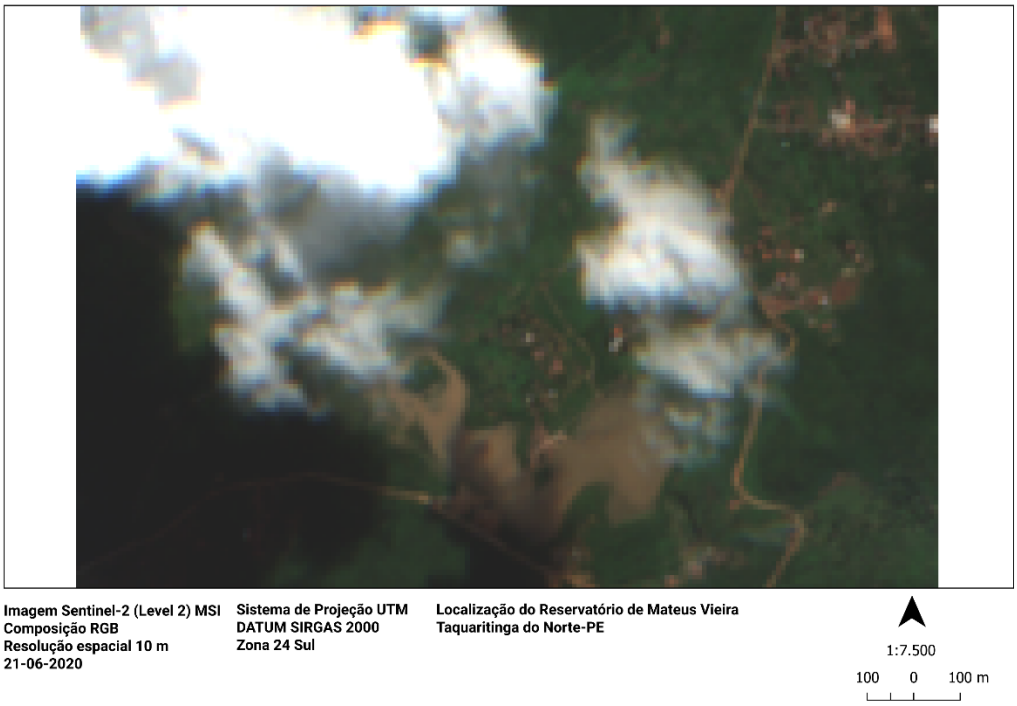
Fonte: GEE (2025).

ANEXO D – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 15-02-2020.



Fonte: GEE (2025).

ANEXO E – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 21-06-2020.

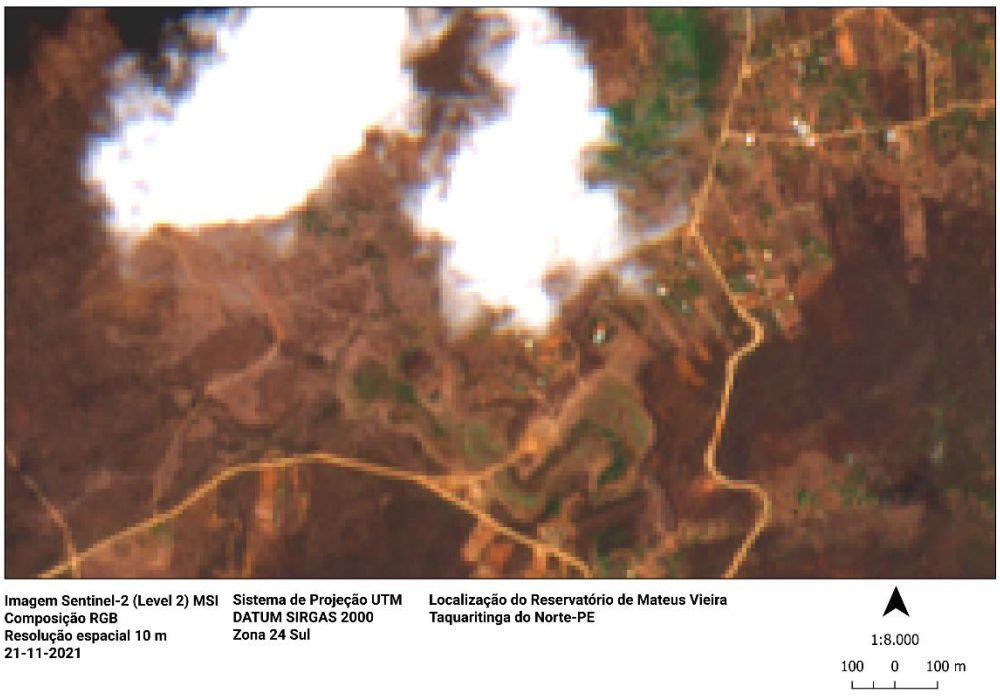


Fonte: GEE (2025).

ANEXO F – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 17-05-2021.

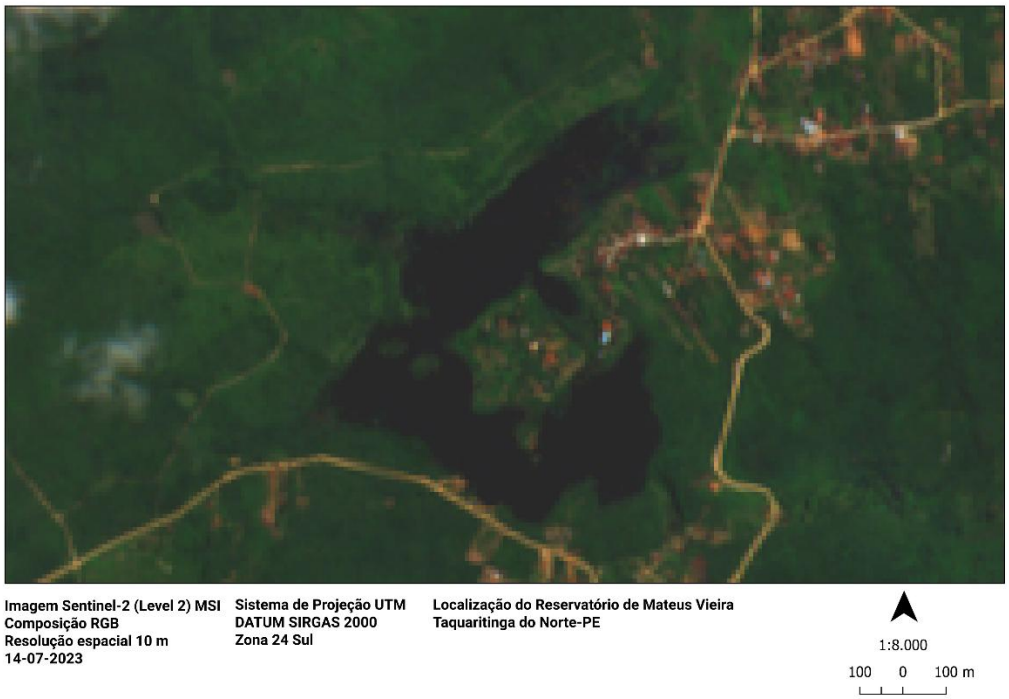
Fonte: GEE (2025).

ANEXO G – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 21-11-2021.



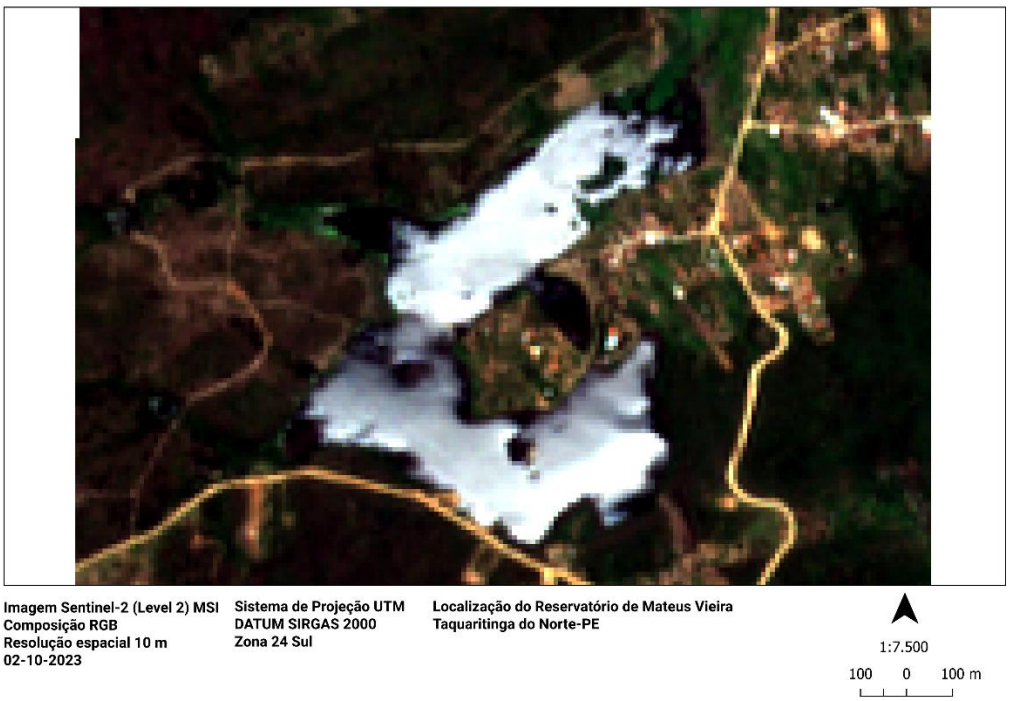
Fonte: GEE (2025).

ANEXO H – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 14-07-2023.



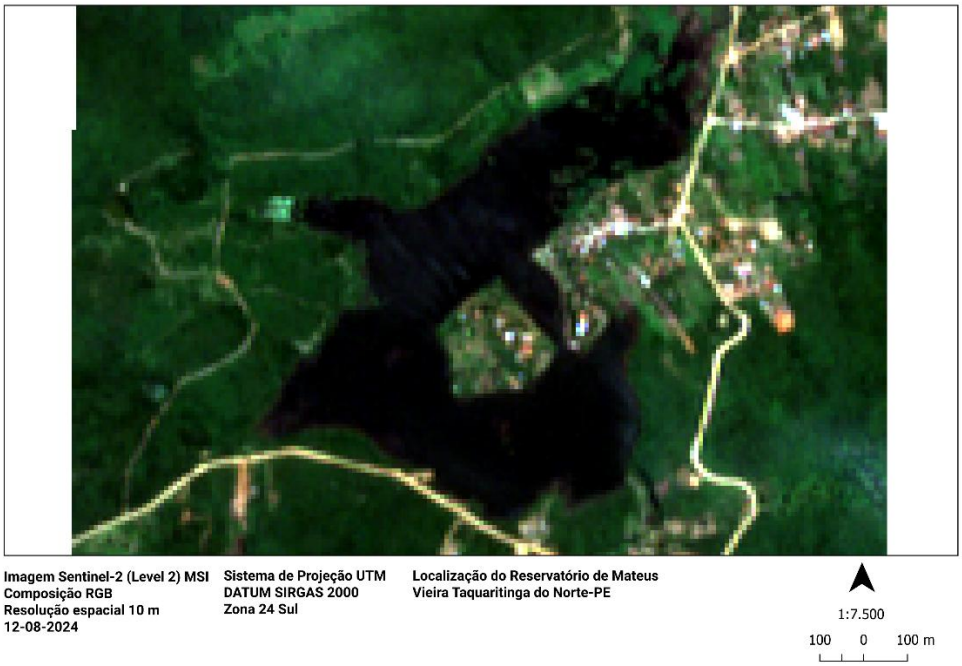
Fonte: GEE (2025).

ANEXO I – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 02-10-2023.



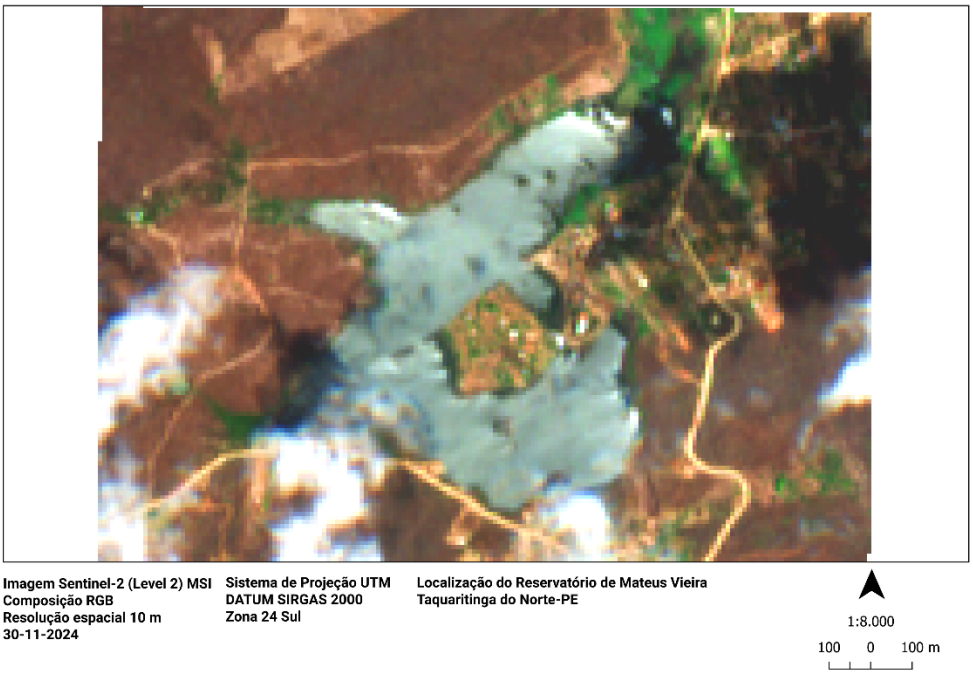
Fonte: GEE (2025).

ANEXO J – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 12-08-2024.



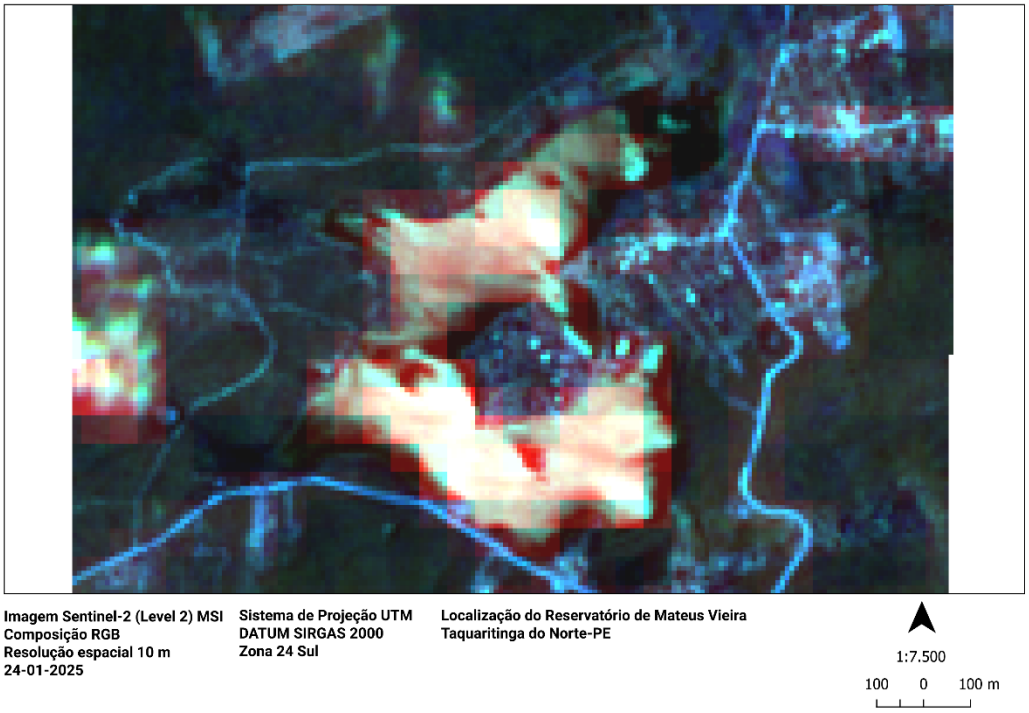
Fonte: GEE (2025).

ANEXO K – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 30-11-2024.



Fonte: GEE (2025).

ANEXO L – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 24-01-2025.



Fonte: GEE (2025).

ANEXO M – Imagem de satélite Sentinel-2, em composição de cor verdadeira (RGB), da área de estudo em 19-04-2025.

Fonte: GEE (2025).