



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA  
INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL E DE RECURSOS HÍDRICOS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM AQUICULTURA E RECURSOS AQUÁTICOS TROPICAIS

**ADRIANA DA CRUZ MELO**

**AVALIAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO  
TOCANTINS, PARÁ, BRASIL: UM PANORAMA NO ESPAÇO E NO TEMPO**

**BELÉM  
2026**

**ADRIANA DA CRUZ MELO**

**AVALIAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO  
TOCANTINS, PARÁ, BRASIL: UM PANORAMA NO ESPAÇO E NO TEMPO**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais, da Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais.

**Orientador(a):** Prof.(a) Dra. Maria de Lourdes Souza Santos

**BELÉM  
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M528a Melo, Adriana  
AVALIAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO  
TOCANTINS, PARÁ, BRASIL: UM PANORAMA NO ESPAÇO E NO TEMPO / Adriana Melo. - 2026.  
59 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Aquicultura e Recursos Aquáticos  
Tropicais (PPGARAT), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia,  
Belém, 2026.

Orientador: Profª. Dra. Maria de Lourdes Souza Santos

1. Baixo Tocantins. 2. Estado trófico. 3. Nutriente. I. Souza Santos, Maria de Lourdes , *orient.* II. Título

---

CDD 636


**ADRIANA DA CRUZ MELO**

**AVALIAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO  
TOCANTINS, PARÁ, BRASIL: UM PANORAMA NO ESPAÇO E NO TEMPO**

Dissertação de Mestrado  
apresentado ao Programa de Pós-  
graduação em Aquicultura e  
Recursos Aquáticos Tropicais, da  
Universidade Federal Rural da  
Amazônia, como parte dos  
requisitos necessários à obtenção  
do título de Mestre em Aquicultura  
e Recursos Aquáticos Tropicais.


**Aprovado em:** 26 de fevereiro de 2026.

**Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente  
 **MARIA DE LOURDES SOUZA SANTOS**  
Data: 04/05/2026 15:28:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

**Prof. Dra. Maria de Lourdes Souza Santos (Orientadora)**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia**

Documento assinado digitalmente  
 **FLAVIO DE ALMEIDA ALVES JUNIOR**  
Data: 30/04/2026 10:15:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

**Flávio Almeida Alves Junior**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia**

Documento assinado digitalmente  
 **MAURICIO WILLIANS DE LIMA**  
Data: 05/05/2026 15:35:27-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Mauricio Willians de Lima**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia**

Documento assinado digitalmente  
 **RAFAEL ANAISCE DAS CHAGAS**  
Data: 04/05/2026 13:39:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Rafael Anaisce das Chagas**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia**

## Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e pela perseverança concedida ao longo de toda a trajetória acadêmica, que tornou possível a realização desse trabalho.

À minha família, expresso minha gratidão pela compreensão, apoio e incentivo. Em especial, agradeço ao meu marido Jéssus Silva, pelo companheirismo, paciência e suporte emocional ao longo do período de dedicação à pesquisa, contribuindo de forma decisiva para a superação dos desafios enfrentados. Dedico também, a duas pessoas muito importantes, que já partiram, meu avô na minha graduação e meu pai no mestrado, que sempre acreditaram em meu propósito e me incentivaram.

Agradeço a minha orientadora professora e doutora Maria de Lourdes, pela orientação científica qualificada, pela disponibilidade, pelo rigor metodológico e pelas contribuições críticas fundamentais ao longo de todas as etapas de desenvolvimento desta pesquisa. Seu acompanhamento foi essencial para o amadurecimento teórico, metodológico e analítico deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais, agradeço pela formação acadêmica oferecida, pelo suporte institucional e pelas condições científicas proporcionadas ao longo do curso, que foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, cujo apoio financeiro foi fundamental para viabilizar a dedicação integral às atividades de pesquisa e a realização deste trabalho.

## RESUMO

A preservação da qualidade da água é essencial para a sobrevivência humana e para a conservação do meio ambiente. Apesar do Brasil possuir a maior quantidade de água doce no mundo, enfrenta crise hídrica em todo o território devido a problemas como falta de saneamento, a poluição da agropecuária e a falta de reutilização da água. A bacia hidrográfica do Rio Tocantins-Araguaia, a segunda maior do país, engloba uma vasta área com 430 municípios distribuídos nos estados do Pará, Maranhão, Tocantins, Goiás e Mato Grosso. O foco deste estudo é o Baixo Tocantins, no nordeste do Pará, onde serão avaliados parâmetros abióticos e biótico da água para compreender a dinâmica ambiental. Fatores como uso do solo, ações antrópicas e períodos de chuvas intensas influenciam a qualidade da água, aumentando a turbidez e os níveis de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que podem provocar eutrofização. A Resolução CONAMA 357/2005 é um instrumento fundamental para monitorar os padrões de qualidade da água no Brasil, contribuindo para o uso sustentável deste recurso vital. Este estudo teve o objetivo de avaliar os parâmetros ambientais, calcular o Índice de Estado Trófico (IET) e analisar a influência da sazonalidade, com foco em onze pontos distribuídos em sete municípios paraenses, a fim de subsidiar o planejamento das ações de preservação da água na região. Os resultados mostram a influência da sazonalidade sobre a qualidade da água, com maiores valores de condutividade elétrica no período menos chuvoso ( $79 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) em comparação ao chuvoso ( $65 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), indicando maior concentração de íons dissolvidos. A clorofila a também foi mais elevada no período menos chuvoso ( $12,2 \mu\text{g L}^{-1}$ ) em relação ao chuvoso ( $9,8 \mu\text{g L}^{-1}$ ), sugerindo maior aporte de nutrientes. A turbidez foi superior no período menos chuvoso (97 UNT), enquanto o oxigênio dissolvido manteve valores próximos a  $6,4 \text{ mg L}^{-1}$  em ambos os períodos. O Índice de Estado Trófico variou entre 51,32 e 52,11 indicando condição mesotrófica e influência da sazonalidade na dinâmica limnológica da região.

Palavras-chave: Baixo Tocantins; Estado trófico; Nutriente.

## ABSTRACT

Preserving water quality is essential for human survival and environmental conservation. Despite Brazil possessing the largest amount of freshwater in the world, it faces a water crisis throughout its territory due to problems such as lack of sanitation, pollution from agriculture, and lack of water reuse. The Tocantins-Araguaia River basin, the second largest in the country, encompasses a vast area with 430 municipalities distributed across the states of Pará, Maranhão, Tocantins, Goiás, and Mato Grosso. This study focuses on the Lower Tocantins region in northeastern Pará, where abiotic and biotic water parameters will be evaluated to understand the environmental dynamics. Factors such as land use, anthropogenic actions, and periods of intense rainfall influence water quality, increasing turbidity and nutrient levels, such as nitrogen and phosphorus, which can lead to eutrophication. CONAMA Resolution 357/2005 is a fundamental instrument for monitoring water quality standards in Brazil, contributing to the sustainable use of this vital resource. This study aimed to evaluate environmental parameters, calculate the Trophic State Index (TSI), and analyze the influence of seasonality, focusing on eleven points distributed across seven municipalities in Pará state, in order to support the planning of water preservation actions in the region. The results show the influence of seasonality on water quality, with higher values of electrical conductivity in the less rainy period ( $79 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) compared to the rainy period ( $65 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), indicating a higher concentration of dissolved ions. Chlorophyll a was also higher in the less rainy period ( $12.2 \mu\text{g L}^{-1}$ ) compared to the rainy period ( $9.8 \mu\text{g L}^{-1}$ ), suggesting a greater supply of nutrients. Turbidity was higher during the less rainy period (97 NTU), while dissolved oxygen remained close to  $6.4 \text{ mg L}^{-1}$  in both periods. The Trophic State Index ranged from 51.32 to 52.11, indicating a mesotrophic condition and the influence of seasonality on the limnological dynamics of the region.

Keyword: Lower Tocantins; trophic state; Nutrient

## SUMÁRIO

<b>AVALIAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO TOCANTINS, PARÁ, BRASIL: UM PANORAMA NO ESPAÇO E NO TEMPO.....</b>	<b>9</b>
<b>1- INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>9</b>
<b>2- JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>11</b>
<b>3- OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
3.1 Objetivo geral.....	12
3.2 Objetivos específicos.....	12
<b>4- REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
4.1 Bacia Hidrográfica do Norte.....	13
4.2 Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia.....	13
4.3 Qualidade da Água.....	15
4.4 Parâmetros da Qualidade da Água.....	15
4.4.1 potencial Hidrogeniônico (pH) .....	15
4.4.2 Condutividade elétrica.....	16
4.4.3 Sólidos totais dissolvidos.....	16
4.4.4 Oxigênio dissolvido.....	16
4.4.5 Fósforo total.....	16
4.4.6 Turbidez.....	17
4.4.7 Clorofila <i>a</i> .....	17
<b>5- MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
5.1 Área de estudo.....	18
5.2 Coleta, amostragem e análise da qualidade da água.....	19
5.3 Clima.....	19
5.4 Vegetação.....	19
5.5 Geologia.....	20
5.6 Hidrologia.....	20
5.7 Dados abióticos e clorofila <i>a</i> .....	20
5.8 Índice de Estado Trófico.....	21
5.9 Estatística.....	22
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>23</b>

<b>HYDROCLIMATIC VARIABILITY AND WATER QUALITY RESPONSES IN THE EASTERN AMAZON: INSIGHTS FROM THE TOCANTINS-ARAGUAIA BASIN, BRAZIL.....</b>	<b>29</b>
<b>1- INTRODUCTION.....</b>	<b>30</b>
<b>2- MATERIALS AND METHODS.....</b>	<b>33</b>
2.1 Study Area.....	33
2.2 Precipitation and climatological events.....	34
2.3 Water quality classification and parameters.....	35
2.4 Trophic State Index (TSI).....	35
2.5 Comprehensive Pollution Index (CPI).....	36
2.6 Land-use and land-cover analysis.....	37
2.7 Statistical analysis.....	38
<b>3- RESULTS.....</b>	<b>39</b>
3.1 Hydroclimatic conditions during the study period.....	39
3.2 Water quality variability in the Tocantins-Araguaia Basin .....	39
3.3 Trophic state patterns (TSI).....	41
3.4 Integrated pollution assessment (CPI).....	42
3.5 Multivariate relationships among environmental variables and land-use patterns.....	43
<b>4- DISCUSSION.....</b>	<b>47</b>
4.1 Hydroclimatic control on water quality variability.....	47
4.2 Nutrient dynamics and trophic state responses.....	49
4.3 Role of suspended particles and sediment transport.....	51
4.4 Influence of land-use dynamics on water quality.....	52
<b>5- CONCLUSION.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERENCIA.....</b>	<b>56</b>

## CAPÍTULO 1

### 1- INTRODUÇÃO GERAL

A importância da qualidade da água para a sobrevivência humana é incontestável. O uso consciente desse recurso não só assegura uma vida saudável, mas também protege o meio ambiente (Du et al., 2022). A gestão adequada e monitoramento dos parâmetros físico-químicos são fundamentais para a preservação do ecossistema, tanto no Brasil quanto no mundo (PARÁ, 2022).

O Brasil, apesar de possuir a maior reserva de água doce do planeta, enfrenta uma crise hídrica devido, em parte, à falta de medidas eficazes de reutilização da água na agropecuária (Ferreira e Ribeira, 2022), falta de saneamento básico em todo o país impacta os corpos d'água, além da falta de políticas públicas a gestão hídrica (Guimarães et al., 2022).

A Agenda 2030 ressalta a vital importância da sustentabilidade dos recursos hídricos, com destaque para dois de seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): o ODS 6, que trata da água potável e saneamento, e o ODS 14, relacionado à vida na água. A qualidade da água é um ponto central nestes objetivos, tornando essas informações de extrema relevância para o Estado e para o Brasil, visto que contribuem significativamente para a preservação dos nossos recursos hídricos (Martins et al., 2024). No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) é responsável por estabelecer normas e diretrizes para o uso e preservação dos recursos naturais. A Resolução Conama nº 357, de 2005, estabelece diretrizes para a classificação das águas superficiais do país, levando em consideração parâmetros como salinidade, que permite classificar as águas em doce, salobra e salina (BRASIL, 2005).

Dentro desse contexto, as bacias hidrográficas desempenham um papel fundamental na distribuição e disponibilidade dos recursos hídricos em todo o território nacional. Visto que, a água proveniente das bacias hidrográficas é utilizada para abastecimento humano, agricultura, geração de energia, entre outras atividades (ANA, 2022).

A bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia abrange uma extensa área do território nacional, é formada pelos rios Tocantins e Araguaia, que se encontram no estado do Tocantins e seguem em direção ao norte do país. Com uma extensão de cerca de 918.822 km<sup>2</sup>, essa bacia é fundamental para o abastecimento de água de diversos

municípios, além de ser importante para navegação, pesca e geração de energia elétrica (Gomes et al., 2019; Baia et al., 2022).

O rio Tocantins possui cerca de 2.400 Km de extensão e se forma a partir da confluência dos rios das Almas e Maranhão. Suas nascentes estão localizadas no Planalto de Goiás, a cerca de 1.000 metros de altitude, ao norte da cidade de Brasília (ANA, 2022).

O uso e ocupação do solo, em especial nas mesorregiões da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia, tem impacto na fauna, flora e na quantidade de água disponível, levantando-se alerta sobre gestão dos recursos hídricos da região (Bernardino; Ribeiro, 2023).

O entendimento da dinâmica ambiental de bacias hidrográficas requer uma análise hidrológica, bem como o conhecimento das características físicas e biológicas que desempenham um papel importante no ciclo hidrológico. Esses elementos desempenham um papel crucial na regulação da infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial e subterrâneo (Raiol et al., 2022).

A compreensão do transporte e dispersão de nutrientes ao longo do curso de um rio é essencial, pois esse processo pode ter implicações significativas, capazes de afetar de maneira tanto positiva quanto negativa os seres vivos que ali habitam. Fatores como o aumento do escoamento superficial são relevantes durante os períodos de chuvas intensas, pois podem levar a mudanças nos parâmetros físico-químicos da água, como turbidez, concentração de oxigênio e níveis de nutrientes dissolvidos (Theodosio et al., 2023).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é analisar dados dos parâmetros abióticos e bióticos, calcular o índice de estado trófico (IET) para determinar o grau de eutrofização das águas da bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia. Além disso, o estudo foca em avaliar como a sazonalidade, influencia as condições das águas nos municípios localizados no estado do Pará. Municípios como Abaetetuba, Abel Figueredo, Bom Jesus do Tocantins, Breu Branco, Itupiranga, Mocajuba e Novo Repartimento foram incluídos neste estudo, o que possibilitou uma visão abrangente das alterações que ocorreu em diferentes locais ao longo do percurso do rio.

A realização desse estudo fornecerá subsídios valiosos para responder de maneira eficaz a diversas questões que estão colocadas dentro da Agenda 2030, contribuindo para o alcance dos objetivos de desenvolvimento sustentável preconizados na agenda global.

## 2- JUSTIFICATIVA

O primeiro fator está relacionado às condições naturais de como a bacia hidrográfica se encontra, como o tipo de solo, a existência de vegetação, entre outros. A segunda característica está associada às atividades antrópicas ao longo do percurso do curso d'água: por exemplo, se há centros urbanos, manejo e gestão de resíduos líquidos e sólidos (Silva, *et al.*, 2024). Muitas vezes, a bacia hidrográfica serve como depósito para o lançamento de fontes poluentes sem tratamento adequado, causadas pela ação antrópica. A presença de elementos na água, como os metais, compromete a qualidade dos corpos hídricos e causa danos à saúde ambiental (Rocha *et al.*, 2023).

Em um cenário de crescente escassez de recursos hídricos, observa-se um contraste marcante com o aumento contínuo da demanda global por água. Essa situação se intensifica com a degradação ambiental, desmatamento, erosão acelerada, assoreamento dos corpos hídricos e contaminação por efluentes domésticos e industriais, fatores que afetam a qualidade e a disponibilidade da água. As pressões antrópicas sobre as bacias hidrográficas têm ampliado os riscos de contaminação, reduzido a capacidade de regulação hídrica e agravando as vulnerabilidades socioambientais, em regiões tropicais (Silva *et al.*, 2022; Santos & Almeida, 2023; Pereira *et al.*, 2024).

No entanto é necessária uma gestão eficaz para promover a proteção ambiental para a utilização eficiente dos recursos hídricos, tornando viável os usos múltiplos desses recursos para gerações futuras (Vikou *et al.*, 2023).

Dentro deste contexto, a qualidade da água de uma bacia hidrográfica está associada às condições naturais, existindo fatores com características próprias que são responsáveis por essa qualidade. As áreas urbanas à margem da legislação de uso do solo, juntamente com a especulação imobiliária, estão sendo reproduzidas em diversos locais. Isso resulta na ocupação de áreas sem infraestrutura sanitária, causando a degradação da qualidade das águas naturais (Silva, *et al.*, 2024).

Este estudo se propõe a entender como a sazonalidade influencia na qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia, ao longo do tempo, nos anos de 2022, 2023 e 2024.

### **3- OBJETIVOS**

#### 3.1 Objetivo geral:

Avaliar a qualidade das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia, nos anos de 2022, 2023, 2024, buscando identificar alterações na composição físico-químico e biológica dessa água ao longo do tempo e do espaço.

#### 3.2 Objetivos específicos:

- Avaliar a variação no tempo e no espaço dos parâmetros físico-químico de pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, oxigênio dissolvido, fósforo total e clorofila a;
- Relacionar os dados dos parâmetros abióticos e clorofila a com a sazonalidade da região na Bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia, nos anos de 2022, 2023, 2024;
- Determinar o índice de estado trófico das águas da Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia do índice calculado a partir da clorofila a e fósforo total;
- Comparar os dados dos parâmetros estudados com os valores descritos na Resolução do CONAMA 357/2005.

## 4- REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Bacia Hidrográfica do Norte

A bacia hidrográfica designa uma área territorial específica que compreende inter-relações sociais, econômicas e ambientais, formada por uma rede de drenagem superficial composta por rios e seus afluentes, os quais convergem para um curso principal que desemboca no mar (Biasi, Falsarelle & Mariosa, 2023).

O Brasil é dividido em 12 Regiões Hidrográficas (RH), conforme Resoluções nº 30/2002 e nº 32/2003 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). O estado do Pará está inserido em três dessas regiões: 73% na RH Amazônica, 23% na RH Tocantins-Araguaia e 4% na RH Atlântico Nordeste Ocidental (PARÁ, 2021).

A Região Hidrográfica Amazônica, que abrange a maior parte do território paraense, destaca-se por possuir a maior rede de drenagem do planeta, tanto em extensão quanto em volume hídrico, desempenhando papel fundamental na regulação do ciclo hidrológico global e na manutenção da biodiversidade aquática e terrestre. No entanto, apesar de sua aparente abundância hídrica, essa região vem sendo progressivamente impactada por atividades antrópicas, como desmatamento, expansão agropecuária, mineração e urbanização, que alteram a dinâmica hidrossedimentológica e comprometem a qualidade da água (Sousa et al., 2022).

Estudos recentes apontam que mudanças no uso e cobertura da terra em bacias amazônicas têm intensificado processos de erosão, aumento da carga de nutrientes e sedimentos, e alterações nos regimes de vazão, evidenciando a necessidade de uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos (Silva et al., 2025; Pereira et al., 2023).

### 4.2 Bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia

A bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia abrange dois principais biomas do Brasil: o Amazônico e o Cerrado. O bioma Amazônico, com mais de 4 milhões de km<sup>2</sup>, destaca-se por abrigar a maior biodiversidade do planeta e desempenhar papel central na regulação climática regional e global (MMA, 2022). Entretanto, essa riqueza ecológica enfrentar ameaças significativas decorrentes de atividades antrópicas como construção de barragem, desmatamento e poluição hídrica, que compromete a qualidade de água, alterando o habitat, a fauna e a flora da região (Baia et al. 2022).

O Cerrado constitui o segundo maior bioma da América do Sul, estendendo-se por aproximadamente 2 milhões de km<sup>2</sup>, o que representa cerca de 23% do território brasileiro, sendo amplamente reconhecido como uma das savanas tropicais com maior biodiversidade do mundo (Pereira et al., 2023).

Nos últimos anos, a bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia tem enfrentado fortes pressões ambientais, como mudanças na cobertura do solo, degradação dos recursos hídricos e impactos na natureza. As principais ameaças vêm do setor do agronegócio, a geração de energia elétrica, a aquicultura e ausência de saneamento básico adequada (Baia et al., 2022). A ocupação desenfreada dos solos, além de deteriorar, resulta na interrupção da qualidade ambiental das bacias hidrográficas, afetando os parâmetros físico-químico dos corpos d'água.

A construção de hidrelétricas e outras de infraestrutura intensifica esses desequilíbrios, podendo comprometer espécies endêmicas e a dinâmica natural dos rios (Santos et al., 2024). Este cenário crítico foi agravado pela pior crise hídrica registrada no Brasil em 2021, considerada a mais severa dos últimos 91 anos, que evidenciou a vulnerabilidade ambiental e a escassez de recursos hídricos, reforçando a importância da gestão integrada do ciclo hidrológico (Almeida e Nogueira, 2023).

O uso intensivo dos recursos hídricos na Amazônia amplia as vulnerabilidades socioambientais, comprometendo a qualidade da água e a subsistência das populações ribeirinhas. Mesmo em áreas com abundância hídrica, muitas comunidades enfrentam insegurança no acesso à água devido à desigualdade social e precariedade do serviço público, demonstrando que a disponibilidade de recursos não garante seu uso sustentável e equitativo (Mata et al., 2025).

Segundo Lima (2023) o bom funcionamento das bacias hidrográficas é uma responsabilidade coletiva, envolvendo educadores, governantes e cada cidadão comprometido em garantir a qualidade de vida. Essa qualidade está intrinsecamente ligada à preservação ambiental, beneficiando tanto os indivíduos quanto a sociedade.

A agenda 2030 das Nações Unidas consolida a integração entre dimensões sociais, ambientais e econômicas por meio de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), oferecendo um marco estratégico para o manejo sustentável dos recursos naturais. O ODS 6, que assegura o acesso universal à água potável e saneamento e o 14 que trata da importância de cuidar da vida na água, destaca a necessidade de reduzir a poluição hídrica, controlar a liberação de substâncias químicas e implementar gestão eficiente dos recursos hídricos como condição essencial para alcançar a sustentabilidade e a resiliência das

comunidades (UN-Water, 2023).

O rio Tocantins, com aproximadamente 2.400 km de extensão, origina-se da confluência dos rios das Almas e Maranhão, nas proximidades do Planalto de Goiás, a cerca de 1.000 metros de altitude, ao norte de Brasília (ANA, 2022). A análise crítica da bacia revela que, apesar de sua relevância socioeconômica e ecológica, a gestão hídrica ainda enfrenta desafios complexos relacionados à ocupação territorial, exploração de recursos e impactos antrópicos.

### 4.3 Qualidade da Água

O recurso hídrico é fonte de vida, fundamental ao desenvolvimento do planeta, assim como para os seres humanos, e de todos os seres vivos habitantes, sejam eles animais ou vegetais, além de também ser fundamental ao desenvolvimento econômico do país como por exemplo o Brasil, a qual as pessoas precisam ter a qualidade deste recurso de forma satisfatória e adequada (Souza; Lima, 2021).

O Portal Hidrometeorológico – HIDROMET, integrado à base de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) disponibiliza previsões atuais de vazão, precipitação, nível dos rios, além de informações sobre enchentes e vazantes. Esses dados são essenciais para subsidiar diagnósticos hidrológicos, apoiar a proposição de medidas mitigadoras e contribuir par redução de impactos ambientais, promovendo a saúde e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos (PARÁ, 2022).

Dos Santos et al. (2021), afirma que o monitoramento da qualidade da água é fundamental na gestão de conservação de recursos hídricos, mediante às ações antrópicas.

### 4.4 Parâmetros da Qualidade da Água

#### 4.4.1 potencial Hidrogeniônico (pH)

Segundo Esteves (1998), os valores de pH em ambientes aquáticos podem ser influenciados por diversos fatores, sobretudo pela concentração de íons  $H^+$  resultantes da ionização do ácido carbônico, processo que tende a reduzir o pH. No entanto, as interações entre os íons carbonato e a molécula da água podem elevar o pH, tornando o meio mais alcalino. Por outro lado, pode ocorrer a uma leve acidificação no ecossistema aquático, fenômeno possivelmente observado em ambientes tropicais devido à

decomposição de matéria orgânica, processo que libera compostos ácidos e pode contribuir para compostos ácidos e pode contribuir para a redução do pH da água, conforme observado por (Akinnigbagbe et al. 2025).

#### 4.4.2 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica da água (CE) representa a medida de sua capacidade de conduzir corrente elétrica. Como a corrente elétrica é transportada por íons em solução, a condutividade aumenta conforme a concentração de íons também aumenta. Nas águas continentais, os íons que mais influenciam os valores de condutividade são o cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, cloreto e sulfato (Esteves, 2011).

#### 4.4.3 Sólidos totais dissolvidos

Todos os contaminantes da água, com exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a carga de sólidos. Por esta razão, os sólidos são analisados separadamente, antes de se apresentar os vários parâmetros de qualidade da água. Simplificadamente, os sólidos podem ser classificados de acordo com as suas características físicas, em sólidos em suspensão, coloidais ou dissolvidos, ou pelas suas características químicas, em sólidos orgânicos ou inorgânicos, os quais juntos formam os sólidos totais (Von Sperling, 2005).

#### 4.4.4 Oxigênio dissolvido

Segundo Pereira (2020), o Oxigênio Dissolvido (OD) expressa a qualidade do ambiente aquático e tem essencial importância para os organismos aeróbios. A dissolução de gases na água sofre a influência de distintos fatores ambientais (temperatura, pressão, salinidade, organismos fotossintéticos) e antrópicos (introdução de aeração artificial).

No entanto, os teores de oxigênio dissolvido variam conforme os processos físicos, químicos e biológicos. Os valores de OD nos corpos d'água têm a solubilidade variada conforme a altitude e temperatura, logo: valores de OD superiores à saturação são indicativos da presença de algas (fotossíntese), valores de OD bem inferiores à saturação são indicativos da presença de matéria orgânica (Sampaio; Pinto, 2022).

#### 4.4.5 Fósforo total

O fósforo é essencial e limitante para o crescimento de plantas e dos organismos em ecossistemas aquáticos, mas o excesso em águas superficiais devido a esgoto não tratado e lixiviação de nutrientes de atividades agrícolas e urbanas, pode levar a

eutrofização (Hansen; Feiden, 2025).

Episódios de precipitação intensa elevam substancialmente o fluxo de fósforo para os ambientes aquáticos, uma vez que promovem maior escoamento superficial e intensificam a erosão, aumentando o transporte de sedimentos ricos em fósforo. Além disso, a energia hidráulica gerada por chuvas fortes pode ressuspender material depositado no leito dos corpos d'água, ampliando a disponibilidade de fósforo tanto na forma dissolvida quanto particulada. Assim, eventos pluviométricos extremos representam um dos principais impulsionadores do aporte externo e interno desse nutriente nos sistemas de água doce (Hansen; Feiden, 2025).

#### 4.4.6 Turbidez

A turbidez da água indica a presença de sólidos em suspensão totais em corpos hídricos, que podem ser de origem natural como partículas do solo: areia, silte e argila ou micro-organismos, ou serem originárias de atividades antropogênicas, como resíduos domésticos e industriais (Oliveira, 2024).

O desmatamento intensifica os processos erosivos e o transporte de sedimentos, contribuindo para o aumento da turbidez da água e para a introdução de poluentes nos ambientes aquáticos (Acioly et al., 2024).

#### 4.4.7 Clorofila *a*

A clorofila *a* é o tipo de pigmento fisiologicamente mais importante, presente em todos os grupos vegetais, sendo sua quantidade um bom estimador da biomassa fitoplanctônica presente nas águas naturais (Gómez, et al., 2025). A clorofila *a* possui um papel central na compreensão dos ciclos biogeoquímicos e dos efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas aquáticos (Dai et al., 2023).

A biomassa do fitoplâncton assim definida, não é uma variável fácil para ser determinada em amostras naturais. No entanto, para determinar a presença do pigmento fotossintético da clorofila *a*, é necessário ser amplamente utilizada na ecologia aquática como importante índice de biomassa do fitoplâncton (Esteves, 2011).

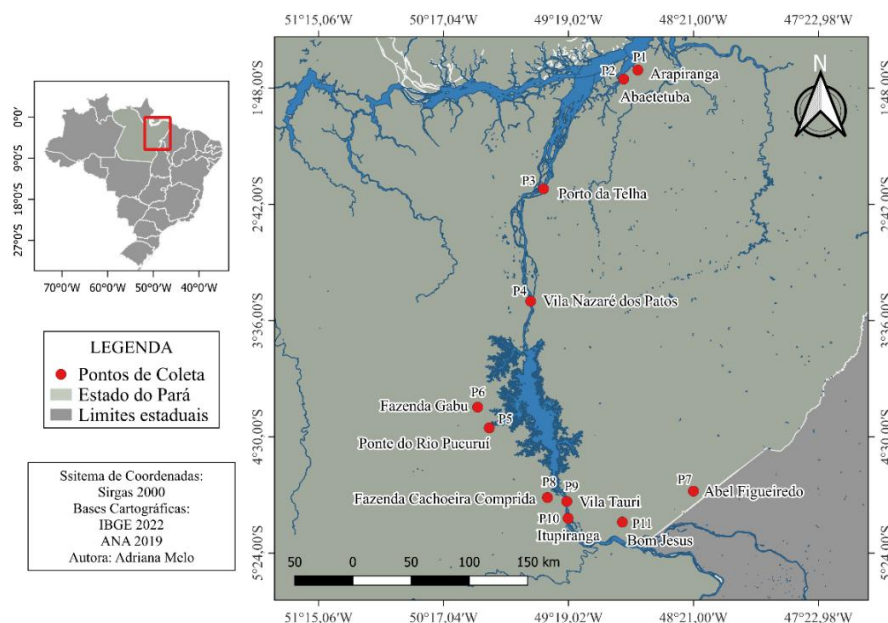
## 5- MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Área de estudo

A bacia do Tocantins-Araguaia abrange dois principais biomas do Brasil: o Amazônico e o Cerrado, o amazônico é o maior bioma brasileiro, cobre uma área de mais de 4 milhões de km<sup>2</sup>, considerado a maior biodiversidade do mundo. A preservação desse vasto ecossistema tem sustentado processos cruciais de regulação do clima, e isso é relevante em dimensões regionais e globais (MMA, 2022). Essas áreas possuem uma rica biodiversidade que está sendo comprometida pelas atividades antrópicas: construção de barragem; desmatamento; poluição dos rios, que impacta negativamente na qualidade de água, alterando o habitat, a fauna e a flora da região (Baia et al. 2022).

Segundo o levantamento da CODEVASF (2023), a bacia hidrográfica do Baixo Tocantins se está localizada no nordeste do estado do Pará e abrange uma área de aproximadamente 33.790 km<sup>2</sup>. Sua extensão percorre 97 municípios paraenses, porém destes foram selecionados para esse estudo apenas 7 municípios, abrangendo os respectivos pontos: Abaetetuba, Abel Figueredo, Bom Jesus do Tocantins, Breu Branco, Itupiranga, Mocajuba e Novo Repartimento de acordo com a figura 1.

Figura 1 - Localização dos pontos de coletas ao longo da Bacia do Tocantins, no Estado do Pará.



Fonte: O autor (2025).

## 5.2 Coleta, amostragem e análise da qualidade da água

A coleta de dados foi fornecida pelo banco de dados da Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará (SEMAS), para obtenção dos parâmetros abióticos e bióticos além de calcular os índices de estado trófico (IET) (PARÁ, 2022).

O monitoramento é feito de duas formas: primeira em campo, in loco utilizando a sonda multiparâmetro modelo EXO1 e a segunda maneira é por análise laboratorial analisando os parâmetros físico-químicos, biológico da água.

Os métodos utilizados seguiram padrões laboratoriais certificados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). Os dados coletados serão publicados no Boletim de Qualidade da Água e disponibilizados no portal Hidromet ([www.semas.pa.gov.br/hidromet](http://www.semas.pa.gov.br/hidromet)) como referência para pesquisas ambientais e acadêmicos (PARÁ, 2022).

O rio Tocantins possui aproximadamente 2.400 km de extensão (ANA, 2025) e se forma pela confluência dos rios Almas e Maranhão. As nascentes desses rios estão localizadas no Planalto Central, a cerca de 1.000 metros de altitude, abrangendo uma área de drenagem de aproximadamente 764.996 km<sup>2</sup> até sua foz, dos quais 385.060 km<sup>2</sup> pertencem à bacia do rio Araguaia. O rio Araguaia nasce na Serra do Caiapó, a cerca de 850 metros de altitude, percorrendo um trajeto de 2.600 km até desaguar no rio Tocantins. 16 Desse percurso, 76,92% (2.000 km) ocorre em uma altitude média de 90 metros (ANA, 2009).

## 5.3 Clima

A região hidrográfica do Tocantins–Araguaia possui um clima tropical e úmido com temperatura média anual em torno de 26°C. O regime climático é marcado por duas estações bem definidas: a chuvosa, que ocorre de outubro a abril e concentra mais de 90% da frequência anual, embora apresente alguns dias secos entre janeiro e fevereiro, conhecidos como “veranico”; e a seca, que se estende de maio a setembro, caracterizada pela baixa umidade relativa do ar (Valadão et al., 2023).

## 5.4 Vegetação

A vegetação da bacia do Tocantins-Araguaia que se localiza ao norte do bioma Amazônico é formada por vegetação ecótono e da Amazônia-Cerrado ao sudeste representa principalmente por florestas ombrófilas (Martins et al., 2021).

### 5.5 Geologia

A geomorfologia da bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia é constituída de solos argissolos, cambiossolos, gleissolos, latossolos, neossolos, plintossolos. A caracterização geológica apresenta depressões, planícies, tabuleiros, chapadas, patamares e planaltos (Martins et al., 2021).

### 5.6 Hidrologia

Na bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia, o rio que se destaca é o Tocantins, cuja nascente se localiza nas cidades Goianas de Ouro Verde e Petrolina de Goiás, a aproximadamente 1.100 metros de altitude. Este rio percorre os estados de Goiás, Tocantins, Maranhão e Pará, sendo também conhecido como Tocantins-Araguaia, devido à sua confluência com o rio Araguaia na fronteira entre Tocantins e Pará (ANA, 2025). O principal afluente do rio Tocantins é o rio Araguaia, que nasce na Serra do Caiapó, próximo aos limites entre os estados de Mato Grosso e Goiás. Ao se encontrar com o rio Araguaia na região conhecida como Bico do Papagaio, formam juntos 17 a Bacia Hidrográfica do Araguaia-Tocantins (Pereira et al., 2024).

Os principais afluentes que se formam a partir do rio Tocantins são: o rio das Almas, rio Cana Brava, rio Santa Clara, rio dos Patos, rio Uru, rio Tocantinzinho, rio Sono, rio Cacau, rio Mupi e rio Barra Grande (Siqueira, 2022). As atividades que estão relacionadas a bacia são de subsistência, auxiliando no abastecimento público, navegação, transporte, agricultura, pesca e turismo. Essas atividades dependem desse recurso hídrico (Católico; Strauch, 2024).

### 5.7 Dados abióticos e clorofila a

Os dados dos parâmetros abióticos e clorofila a foram obtidos no site da Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará – SEMAS, precisamente no portal Hidrometeorológico – HIDROMET, que faz parte da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) e estima as previsões atuais de dados de vazão e chuva, nível do rio, enchente e vazante, e informações da qualidade da água (PARÁ, 2024). Em campo são obtidos dados de temperatura, pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, oxigênio dissolvido, nitrato, turbidez e clorofila a, com a utilização da sonda multiparâmetro modelo EXO1. Dados de taxa de saturação de oxigênio dissolvido, nitrito, N-amoniaco, fósforo total foram analisadas segundo os padrões laboratoriais certificados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro).

Disponibilizados no portal Hidromet ([www.semas.pa.gov.br/hidromet](http://www.semas.pa.gov.br/hidromet)) auxiliando na pesquisa ambiental e acadêmica (PARÁ, 2022). Os dados foram obtidos da bacia hidrográfica do Baixo Tocantins, localizada no nordeste do estado do Pará, abrange uma área de aproximadamente 33.790 km<sup>2</sup>, percorre 15 municípios paraenses (Baia, 2022). No presente estudo foram utilizados 11 pontos de coletas de água ao longo da bacia hidrográfica do baixo Tocantins, distribuídos em 7 municípios do Estado do Pará (Tabela 1), nos anos de 2022, 2023 e 2024.

Tabela 1: Pontos dos Municípios da Bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia

Município	Curso D'água	Pontos	Latitude	Longitude
Abaetetuba	Baia do Capim	P1 - Arapiranga	- 1.66	- 48.78
		P2 - Abaetetuba	-1.73	- 48.89
Mocajuba	Tocantins	P3 - Porto da Telha	- 2.58	- 49.51
Breu Branco	Tocantins	P4 - Vila Nazaré dos Patos	- 3.45	- 49.61
Novo Repartimento	Pucurui-Ararão	P5 - Ponte do Rio Pucurui	- 4.43	- 49.93
	Gabu	P6 - Fazenda Gabu	- 4.27	- 50.02
Abel Figueredo	Igarapé Noventa e Sete	P7-Abel Figueredo	- 4.92	- 48.35
Itupiranga	Cajazeiras	P8 - Fazenda Cachoeira Comprida	- 4.97	- 49.48
	Tocantins	P9 - Vila Tauri	- 5.00	- 49.33
	Tocantins	P10 - Itupiranga	- 5.13	- 49.32
Bom Jesus do Tocantins	Mãe Maria	P11 - Bom Jesus	- 5.16	- 48.90

Fonte: O autor (2025).

### 5.8 Índice de Estado Trófico

Para avaliar o processo de eutrofização será calculado o Índice de Estado Trófico (IET) conforme a classificação de corpos hídricos do estado de São Paulo (CETESB, 2021), que por sua vez segue o modelo modificado de Lamparelli (2004) que utiliza tanto as concentrações de fósforo, como também as concentrações da clorofila a para determinar o grau de trofia. A equação que será utilizada para o cálculo do IET em ambientes lóticos para os parâmetros de fósforo e clorofila-a:  $IET (CL) = 10 \times (6 - ((-0,7 - 0,6 \times (\ln CL)) / \ln 2)) - 20$   $IET (PT) = 10 \times (6 - ((0,42 - 0,36 \times (\ln PT)) / \ln 2)) - 20$  Onde: CL: concentração de clorofila a medida à superfície da água, em µg.L<sup>-1</sup>; PT: concentração de fósforo na superfície da

água, em  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ; ln: logaritmo natural. O resultado do IET será a média aritmética simples dos índices relativos ao fósforo total e a clorofila a, segundo a equação:  $\text{IET} = [\text{IET (PT)} + \text{IET (CL)}] / 2$

A tabela 2 mostra a classificação do Estado Trófico para rios conforme Índice de Carlson modificado (CETESB, 2021). A classificação mostra o princípio dos ambientes conceituados como ultraoligotrófico, que pertence aos corpos d'água limpos e se encontra com pouca concentração de nutrientes, logo sem prejuízos ao uso. No entanto, a cada nível de trofia a qualidade da água vai diminuindo, até se chegar ao nível hipereutrófico, considerado com alta concentração de matéria orgânica e nutrientes, podendo resultar prejuízos ao ambiente como: floração de algas e mortandade de peixes (Lamparelli, 2004).

Tabela 2: Classificação do Estado Trófico para rios segundo índice de Carlson modificado.

Categoria	Ponderação	Fósforo total -P ( $\text{mg.m}^{-3}$ )	Clorofila a – CL ( $\text{mg.m}^{-3}$ )
Ultraoligotrófico	$\text{IET} \leq 47$	$\text{P} \leq 47$	$\text{CL} \leq 0,74$
Oligotrófico	$47 < \text{IET} \leq 52$	$13 < \text{P} \leq 35$	$0,74 < \text{CL} \leq 1,31$
Mesotrófico	$52 < \text{IET} \leq 59$	$35 < \text{P} \leq 137$	$1,31 < \text{CL} \leq 2,96$
Eutrófico	$59 < \text{IET} \leq 63$	$137 < \text{P} \leq 296$	$2,96 < \text{CL} \leq 4,70$
Supereutrófico	$63 < \text{IET} \leq 67$	$296 < \text{P} \leq 640$	$4,70 < \text{CL} \leq 7,46$
Hipereutrófico	$\text{IET} > 67$	$640 < \text{P}$	$7,46 < \text{CL}$

Fonte: CETESB, 2017

### 5.9 Estatística

A metodologia baseia-se em estatística descritiva (valores mínimo, máximo, média e desvio padrão) para avaliar a influência da sazonalidade das amostras da bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia, serão utilizados boxplots na comparação mensal dos dados. Além disso, será aplicada a correlação de Spearman para analisar a relação entre os parâmetros (MONTGOMERY; RUNGER 2003).

A análise de componentes principais é um método que expõe dados n-dimensionais em um local de menor dimensão, capaz de evidenciar informações importantes, logo contribuirá na construção de hipóteses, logo é possível desenvolver estruturalmente os dados, construir gráficos a partir da composição das amostras (scores), e variáveis (loadings), os quais formam os componentes principais (Riboli; Lindino 2023).

## REFERÊNCIAS

- ACIOLY, T. M. D. S.; SILVA, M. F.; BARBOSA, L. A.; IANNACONE, J.; VIANA, D. C. Levels of potentially toxic and essential elements in water and estimation of human health risks in a river located at the interface of brazilian savanna and amazon biomes (Tocantins River). **Toxics**, v. 12, n. 7, p.444, 2024. <https://doi:10.3390/toxics12070444>.
- AKINNIGBAGBE, A. E.; POPOOLA, S. O.; OYATOLA, O. O.; et al. Padrões espaço-temporais da qualidade da água, dinâmica de nutrientes e concentrações de clorofila-a no riacho Five Cowries de 2022 a 2024. **Discover Water**, v. 5, p. 63, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00257-3>
- ALMEIDA, P.; NOGUEIRA, J. FF. Crise hídrica: a resiliência dos biomas brasileiros diante das mudanças climáticas: Para além dos ciclos naturais, como a influência humana agrava o problema da crise hídrica no país. **Ciência e Cultura**, v. 75, n. 4, p. 01-05, 2023. <http://dx.doi.org/10.5935/2317-6660.20230060>
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO BÁSICO). Relatório de situação dos recursos hídricos no Brasil 2022. Brasília, DF: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- BAIA, A. R. S. et al. O processo do uso e ocupação do solo na bacia do baixo Tocantins. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 12, p. 657–665, 2022. DOI: [10.51891/rease.v8i12.8053](https://doi.org/10.51891/rease.v8i12.8053).
- BERNARDINO, T. E. S.; RIBEIRO, H. J. Análise multitemporal do uso e cobertura do solo, lâmina d'água e frequência de fogo da região hidrográfica do tocantins-araguaia. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, n. 1, p. 252-267, 2023. DOI: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/75082>.
- BIASI, E. J.; FALSARELLA, O. M.; MARIOSA, D. B. F. Bacias hidrográficas inteligentes e sustentáveis: uma proposta a partir do estudo de conceitos e aplicações sobre cidades inteligentes. **Revista Brasileira De Iniciação Científica**, v. 10, e 023040, 2023. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/1093>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. “Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências”. Disponível em: [https://www.ana.gov.br/portalpnqa/Publicacao/RESOLUCAO\\_CONAMA\\_n\\_357.pdf](https://www.ana.gov.br/portalpnqa/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf). Acesso em: 19 Dez. 2024.
- CATÓLICO, A. C. C.; STRAUCH, J. Bacia hidrográfica dos rios tocantins e araguaia: índice sintético de diferenças socioespaciais. **Revista Contemporânea**, v. 4, n. 9, e5675-e5675, 2024. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV4N9-046>
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas no estado de São Paulo em 2021. Disponível em:

<https://periodicos.unimesvirtual.com.br/index.php/gestaoenegocios/article/view/1339>.  
Acesso em: 16 de set. 2024.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA (CODEVASF). *Bacia hidrográfica do rio Tocantins*. 2023. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br>

DAI, Y.; YANG, S.; ZHAO, D. *et al.* As florações de fitoplâncton costeiro expandem-se e intensificam-se no século XXI. *Nature* 615 , 280–284 (2023).  
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05760-y>

DU, X. *et al.* Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 10, n.2, p. 188-196, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.08.001>.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 64 p.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 826 p.

FERREIRA, R. M.; RIBEIRO, S. M. A. **Escassez de água no Brasil como consequência do agronegócio. SÉCULO XXI EM DIREITO E CIÊNCIAS JURÍDICAS**, p. 90, 2022. DOI: [10.55232/1082024.4](https://doi.org/10.55232/1082024.4).

GOMES, Evanice Pinheiro; BLANCO, Claudio José Cavalcante; PESSOA, Francisco Carlos Lira. Identification of homogeneous precipitation regions via Fuzzy c-means in the hydrographic region of Tocantins–Araguaia of Brazilian Amazonia. *Applied Water Science*, v. 9, n. 1, p. 6, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0884-6>

GÓMEZ, A. *et al.* Efeitos da variabilidade da clorofila a e da temperatura (2002-2018) em capturas de sardinha no sudeste da Ilha Margarita, Venezuela. *Boletim de Investigaciones Marinas y Costeras*, v. 54, n. 1, p. 9-32, 2025. DOI: <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2025.54.1.1306>.

GUIMARÃES, A. H.; ALVES, P.V.; FLORENCIO, S. R. Geotecnologias Gratuitas Aplicadas à Gestão do Saneamento Básico: um Estudo de Caso na Empresa Baiana de Águas e Saneamento. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 2, e02991, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v16n2-018>.

HANSEN, J. P. M.; FEIDEN, A. A dinâmica do aporte de fósforo na qualidade dos recursos hídricos superficiais. *Aracê*, v. 7, n. 7, p. 36576–36592, 2025. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev7n7-081>

LAMPARELLI, M.C. Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade de São Paulo. 2004. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.41.2004.tde-20032006-075813>.

LIMA, M. F. **Recuperação de nascentes: contribuições de um tema problematizador na formação crítica de estudantes do ensino fundamental II,**

**Jataí, Goiás, Brasil.** Orientador: Dra. Marlei de Fátima Pereira. 2023. 143 f. Dissertação (Mestrado em Educação para Ciências e Matemática) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Jataí, 2023. Disponível em: [https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1920/1/dissertacao\\_Marcelo\\_Fernando\\_de\\_Lima.pdf](https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1920/1/dissertacao_Marcelo_Fernando_de_Lima.pdf). Acesso em: 10 jun. 2025.

MARTINS, Pedro R. et al. Unidades de terreno, uso e cobertura da terra e produtividade primária bruta da maior bacia fluvial na ecotona Amazônia/Cerrado brasileira: a bacia do rio Araguaia. *Applied Geography*, v. 127, p. 102379, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102379>Obtenha direitos e conteúdo.

MARTINS, A. L. J. et al. A Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como estratégia para equidade em saúde e territórios sustentáveis e saudáveis. **Saúde em Debate**, v. 48, p. e8828,2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/2358-28982024E18828P>.

MATA, M. M. et al. Household Water Insecurity in the Western Amazon, Amazonas, Brazil: A Preliminary Approach. **Water**, v. 17, n. 15, p. 2253, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17152253>

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **O Bioma Amazônico**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/biomas/amazonia>> Acesso em : 07de outubro de 2024.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. ed. LTC, 2a ed., Arizona, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

OLIVEIRA, D. K.; SILVA, L. Q.; BRITO, N. N. Monitoramento de trihalometanos (THMs) e da qualidade da água para abastecimento público da cidade de cavalcante, goiás. **Química Nova**, v. 47, n. 4, e-20230116, 2024. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230116>.

PARÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Pará: sumário executivo**. Belém: SEMAS, 2021. [https://www.semas.pa.gov.br/wp-content/uploads/2023/01/Produto\\_Final\\_Sumario\\_Executivo\\_do\\_PERH-PA.pdf](https://www.semas.pa.gov.br/wp-content/uploads/2023/01/Produto_Final_Sumario_Executivo_do_PERH-PA.pdf)

PARÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS). Semas deve ampliar rede de monitoramento da qualidade da água no estado. 05 jan. 2022. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/2022/01/05/semas-deve-ampliar-rede-de-monitoramento-da-qualidade-da-agua-no-estado/>. Acesso em: 06 dez. 2025.

PEREIRA, C. C. et al. O Cerrado brasileiro não pode ser uma zona de sacrifício para a Amazônia: assistência financeira e leis mais rigorosas são necessárias. **Bioscience**, v. 74, n. 9, p. 584-585, 2024.

PEREIRA, Débora R. et al. Avaliação de produtos de precipitação em uma bacia hidrográfica brasileira: estudo de caso da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia. *Climatologia Teórica e Aplicada*, v. 155, n. 8, p. 7845-7865, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s00704-024-05091-6>

PEREIRA, LCC, SOUSA, N. D. S. D. S., SILVA, BRP D., COSTA, ALB D., CAVALCANTE, FRB, RODRIGUES, LM D. S., & COSTA, RM D. (2023). Influência das atividades antropogênicas na qualidade da água de um rio urbano em uma zona não planejada da costa amazônica. **Limnological Review**, 23 (2), 108-125.

<https://doi.org/10.3390/limnolrev23020007>

PEREIRA, E. A. et al. Dados históricos da qualidade da água do rio Toledo. In: Eu, rio Toledo: qualidade ambiental e perspectivas futuras. Cascavel (PR): **EDUNIOESTE**, 2020.

PEREIRA, M. C.; ROCHA, F. A.; MENDONÇA, D. S. Vulnerabilidade hídrica e pressões antrópicas em bacias hidrográficas brasileiras. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 2, e224132451, 2024. Disponível em:

<https://rsdjournal.org/rsd/article/view/32451>. Acesso em: 4 dez. 2025.

RAIOL, L. L. et al. Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Caripi, Zona Costeira Amazônica. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2354–2370. 2022. [doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2354-2370](https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2354-2370).

RIBOLI, S. A.; LINDINO, C. Análise de componentes principais (PCA) na discriminação de fontes de água potável. *Revista Tecnia*, v. 8, n. 2, p. 141–157, 2023. <https://doi.org/10.56762/tecnica.v8i2.577>.

ROCHA, J. S. et al. Bioacumulação de metais pesados em peixes: impactos sobre a saúde humana e meio ambiente. **Ciência Animal**, v. 33, n. 1, p. 40–43, 2023.

SAMPAIO, B. D. S.; PINTO, A. L. Paisagem e qualidade da água na bacia hidrográfica do Córrego da Onça, Três Lagoas, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Formação (Online)**, v. 29, n. 54, p. 199- 223, 2022.

SANTOS, H. R.; ALMEIDA, V. L. Degradação ambiental e disponibilidade hídrica em ambientes amazônicos. **GeoAmazônia**, v. 11, n. 2, p. 45–63, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/geoamazonia/article/view/13780>. Acesso em: 4 dez. 2025.

SANTOS, L. A. et al. Análise da percepção dos estudantes, do ensino básico, sobre os impactos socioambientais causados pela UHE de Tucuruí, estado do Pará. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16,n. 11, e6276-e6276, 2024.

<https://doi.org/10.55905/cuadv16n11-042>

SANTOS, Y. M. Igualdade de gênero, objetivos de desenvolvimento sustentável e a guarda familiar. **Monumenta - Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 2, p. 161–170, 2021. [DOI 10.29327/221823.1.1](https://doi.org/10.29327/221823.1.1)

SILVA, Ana Caroline Santos; ALBUQUERQUE, Debora Albuquerque Debora; FERREIRA, Fernanda Carla Lima. Mapeamento de uso e qualidade das águas da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Criminalística**, v. 14, n. 2, p. 21-32, 2025. DOI:

<http://dx.doi.org/10.15260/rbc.v14i1.916>

SILVA, M. R. F. et al. A importância da gestão de bacias hidrográficas no semiárido brasileiro: um olhar para bacia do rio APODI-MOSSORÓ (RN). **Revista Territorium Terram**, v. 7, n. 11, p. 102-119, 2024. [10.48025/ISSN2675-6900.v5n1.2024.604](https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.v5n1.2024.604)

SILVA, R. M.; OLIVEIRA, J. P.; COSTA, L. A. Impactos antrópicos sobre a qualidade da água em bacias hidrográficas tropicais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 4, p. 1203–1219, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/252890>. Acesso em: 4dez. 2025.

SIQUEIRA, Paulo Alexandre Rodrigues. A proteção do Rio Tocantins e seus afluentes na visão dos Direitos Humanos. **Revista Jurídica do Ministério Público do Estado do Tocantins**, v. 15, n. 1, p. 18-18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.65596/revjurmpto.v15.70>

SOUSA, Rodrigo Silva et al. Conexões entre uso da terra, qualidade da água, biodiversidade de invertebrados aquáticos e comportamento de peixes em rios da Amazônia. **Toxics**, v. 10, n. 4, p. 182, 2022. DOI: [10.3390/toxics10040182](https://doi.org/10.3390/toxics10040182)

SOUZA, A. R. G.; LIMA, D. P. Qualidade da água da bacia do Ribeirão Taquaruçu do Tocantins. **Engineering Sciences**, v. 9, n. 3, p. 22-29, 2021. DOI: [10.6008/CBPC2318-3055.2021.003.0003](https://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2021.003.0003)

THEODOSIO, S. C. S. et al. Estudo físico-químico do Rio Pericumã na Baixada Maranhense. **Revista Interfaces: Saúde, Humanas e Tecnologia**, v. 11, n. 3, p. 3017-3025, 2023. <https://doi.org/10.16891/2317-434X.v11.e3.a2023.pp3017-3025>

UN-Water. **Blueprint for acceleration: SDG 6 synthesis report on water and sanitation 2023**. Nova Iorque, Estados Unidos da América, 2023. <https://www.unwater.org/publications/sdg-6-synthesis-report-2023>

VIEIRA VALADÃO, Larissa et al. Dinâmica Temporal dos Reservatórios de Água para Usinas Hidrelétricas da Bacia Tocantins-Araguaia, Brasil, Baseada em Dados de Sensoriamento Remoto e Estações Hidrometeorológicas. **Water**, v. 15, n. 9, p. 1684, 2023. DOI: [10.3390/w15091684](https://doi.org/10.3390/w15091684)

VIKOU, S. V. D. P. et al. Análise da pressão antrópica sobre manguezais urbanos: Subsídios à proteção ambiental e ao ordenamento territorial. **Sociedade & Natureza**, v. 35, e67515, 2023. DOI: [10.14393/SN-v35-2023-67515](https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-67515).

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas residuárias**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG. 2005.

**CAPÍTULO 2**

PADRONIZADO DE ACORDO COM AS NORMAS DA REVISTA JOURNAL OF  
HYDROLOGY

**HYDROCLIMATIC VARIABILITY AND WATER QUALITY RESPONSES IN  
THE EASTERN AMAZON: INSIGHTS FROM THE TOCANTINS–ARAGUAIA  
BASIN, BRAZIL**

Melo et al. 2026

Percentil: 95% Publicado na Revista Journal of Hydrology

1       **Hydroclimatic variability and water quality responses in the eastern Amazon:**  
2                               **insights from the Tocantins–Araguaia Basin, Brazil**

3  
4       **Abstract**

5       Hydroclimatic variability and land-use change strongly influence water quality dynamics  
6       in large tropical river systems, particularly through their effects on runoff, sediment  
7       transport, and nutrient export. This study evaluates the influence of hydroclimatic  
8       variability and landscape transformation on water quality in the Tocantins–Araguaia  
9       Basin (Pará, Brazil) during 2022–2024 using an integrated approach based on  
10       physicochemical parameters, the Trophic State Index (TSI), and the Comprehensive  
11       Pollution Index (CPI). Data were analyzed using descriptive statistics, non-parametric  
12       tests, Spearman correlation, and Principal Component Analysis (PCA). The results  
13       suggest that hydroclimatic variability, particularly precipitation and associated runoff  
14       processes, was the main driver of temporal changes in water quality. Significant  
15       interannual differences were observed for turbidity, total dissolved solids, and electrical  
16       conductivity, reflecting sediment transport dynamics. Strong correlations between total  
17       phosphorus (TP), TSI, and CPI highlight the central role of nutrient dynamics in  
18       regulating trophic conditions and overall pollution status. PCA indicated that the main  
19       gradient of variability was associated with suspended particles, dissolved solids, and  
20       nutrient-related variables. Despite land-use changes, trophic conditions remained  
21       predominantly oligotrophic to mesotrophic, and CPI values indicated moderate pollution  
22       levels. Overall, water quality in the basin is primarily driven by hydroclimatic variability  
23       and sediment–nutrient interactions, with land-use acting as a secondary modulating  
24       factor.

25

26 **Keywords:** Water quality; Sediment transport; Nutrient dynamics; Trophic State Index;  
27 Comprehensive Pollution Index; Amazon basin.

28

## 29 **1. Introduction**

30 Freshwater systems in tropical regions are strongly regulated by hydrological  
31 variability, which controls sediment transport, nutrient fluxes, mineralization processes,  
32 and primary productivity. In large river basins, seasonal and interannual fluctuations in  
33 precipitation and river discharge can significantly modify water quality patterns,  
34 influencing biogeochemical cycles, nutrient availability, and ecological functioning of  
35 aquatic ecosystems (Meybeck, 2003; Allan and Castillo, 2007). These processes are  
36 particularly relevant in tropical fluvial systems, where climatic seasonality strongly  
37 influences hydrological dynamics and water quality conditions.

38 The Tocantins–Araguaia River Basin is one of the largest hydrographic systems  
39 entirely located within Brazilian territory and plays a strategic role in hydropower  
40 generation, fisheries, navigation, and water supply. In its lower portion, within the eastern  
41 Amazon, hydrological processes are controlled by a marked seasonal rainfall regime and  
42 by increasing anthropogenic pressures related to land-use expansion, infrastructure  
43 development, and population growth. These drivers may alter sediment transport, nutrient  
44 dynamics, and aquatic productivity, potentially affecting water quality patterns across the  
45 basin (Foley et al., 2005; Davidson et al., 2012).

46 In tropical South America, large-scale climatic anomalies associated with the El  
47 Niño–Southern Oscillation (ENSO) represent one of the main drivers of hydroclimatic  
48 variability. ENSO events modify atmospheric circulation patterns and precipitation  
49 regimes, producing significant hydrological responses across the Amazon Basin. El Niño  
50 events are commonly associated with reduced rainfall and drought conditions in the

51 northern Amazon, whereas La Niña episodes tend to intensify precipitation and river  
52 discharge. These climatic anomalies influence sediment mobilization, nutrient transport,  
53 dilution processes, and biogeochemical cycling in river systems (Marengo et al., 2011;  
54 Jiménez-Muñoz et al., 2016). The study period encompasses contrasting hydroclimatic  
55 conditions, including the persistence of La Niña in 2022 and the onset of the 2023–2024  
56 El Niño event, which provides an opportunity to assess water quality responses under  
57 different rainfall regimes in the eastern Amazon.

58         In addition to hydroclimatic forcing, land-use and land-cover changes represent  
59 important drivers of environmental change in tropical watersheds. Deforestation,  
60 expansion of pasturelands, agricultural intensification, and urban growth can modify  
61 infiltration processes, increase surface runoff, and enhance the export of sediments and  
62 nutrients to aquatic systems (Foley et al., 2005; Davidson et al., 2012). Recent advances  
63 in remote sensing and geospatial analysis, such as the datasets provided by the  
64 MapBiomas Project, allow the reconstruction of land-use dynamics and facilitate the  
65 investigation of potential landscape influences on water quality patterns in large tropical  
66 basins.

67         Water quality assessments frequently rely on synthetic indices that integrate  
68 multiple physical, chemical, and biological parameters into simplified indicators. The  
69 Trophic State Index (TSI) is widely used to evaluate eutrophication status based on total  
70 phosphorus and chlorophyll-a concentrations (Carlson, 1977), and adaptations of this  
71 index have been proposed for riverine environments to characterize nutrient enrichment  
72 and primary productivity (Dodds et al., 1998). However, in hydrologically dynamic  
73 systems such as large tropical rivers, trophic indicators alone may not fully capture  
74 broader physicochemical alterations driven by climatic variability and anthropogenic  
75 pressures.

76           In this context, the Comprehensive Pollution Index (CPI) has been increasingly  
77 applied as an integrated metric capable of synthesizing the combined influence of  
78 multiple physicochemical parameters relative to environmental standards. By integrating  
79 different indicators into a single value, CPI allows the assessment of the overall pollution  
80 status of aquatic systems and facilitates comparisons among monitoring sites and  
81 temporal periods (Mekonnen and Tekeba, 2024). The combined application of trophic  
82 indicators and comprehensive pollution indices may therefore provide a more holistic  
83 understanding of water quality dynamics, particularly in river systems subjected to both  
84 climatic variability and landscape transformation.

85           Despite the growing body of research on Amazonian hydrology and water quality,  
86 integrated analyses that simultaneously consider hydroclimatic variability, land-use  
87 dynamics, and synthetic water quality indicators remain limited for large tropical basins.  
88 Understanding how climatic anomalies and landscape transformations interact to  
89 influence trophic conditions and pollution levels is essential for improving water resource  
90 management and environmental monitoring in rapidly changing regions of the Amazon.

91           Therefore, this study aims to evaluate seasonal and interannual water quality  
92 variability in the lower Tocantins–Araguaia Basin (Pará State, Brazil) during 2022–2024.  
93 Specifically, the study investigates how hydroclimatic variability and landscape dynamics  
94 derived from MapBiomas are associated with changes in physicochemical conditions,  
95 trophic status, and integrated pollution levels through the combined application of the  
96 Trophic State Index (TSI) and the Comprehensive Pollution Index (CPI). We hypothesize  
97 that (i) hydroclimatic variability primarily affects variables linked to sediment transport  
98 and dissolved material, and (ii) trophic and integrated pollution indices are comparatively  
99 less sensitive to short-term seasonal fluctuations in this large tropical river system. By  
100 integrating climatic variability, landscape dynamics, and water quality indicators, this

101 study contributes to advancing the understanding of climate–hydrology–water quality  
102 interactions in large tropical rivers.

103 The conceptual framework adopted in this study integrates hydroclimatic  
104 variability, land-use dynamics, and water quality responses in the Tocantins–Araguaia  
105 Basin (**Fig. 1**).

106

107 **Fig. 1.** Conceptual framework illustrating how ENSO-driven hydroclimatic variability  
108 interacts with land-use dynamics derived from MapBiomas, and affects hydrological  
109 processes controlling sediment and nutrient export to rivers, ultimately influencing water  
110 quality evaluated using the Trophic State Index and the Comprehensive Pollution Index  
111 in the Tocantins–Araguaia Basin (Pará, Brazil).

112

## 113 **2. Materials and methods**

### 114 *2.1. Study Area*

115 The Tocantins–Araguaia Hydrographic Region extends approximately between  
116 0°30′–18°05′ S and 45°45′–56°20′ W and represents the largest hydrographic region  
117 entirely located within Brazilian territory, covering an area of about 918,822 km<sup>2</sup> (ANA,  
118 2024). The Tocantins River constitutes the main watercourse of the basin, while the  
119 Araguaia River represents its principal tributary (ANA, 2024). The basin encompasses  
120 portions of the Brazilian states of Goiás, Tocantins, Maranhão, and Pará.

121 This study focuses on the eastern Amazon sector of the basin, located in the state  
122 of Pará. The monitored subregions include the municipalities of Abaetetuba, Abel  
123 Figueiredo, Bom Jesus do Tocantins, Breu Branco, Itupiranga, Mocajuba, and Novo  
124 Repartimento (**Fig. 2**). Water quality data were obtained from the Hydrometeorological  
125 Portal of the Pará State Secretariat for Environment and Sustainability

126 (Hidromet/SEMAS), which compiles data from the National Water Quality Assessment  
127 Program (PNQA) implemented by the National Water and Basic Sanitation Agency  
128 (ANA) in cooperation with SEMAS/PA (ANA, 2023; SEMAS, 2023).

129

130 **Fig. 2.** Location of sampling points along the Tocantins River Basin in the state of Pará.

131

132 Historical data covering the period from 2022 to 2024 were analyzed, totaling 587  
133 records distributed across 11 monitoring sites along the Tocantins–Araguaia River  
134 system. The evaluated parameters included total dissolved solids (TDS), electrical  
135 conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), hydrogen potential (pH), turbidity, total  
136 phosphorus (TP), and chlorophyll-a (Chl-a). These variables were selected due to their  
137 relevance for evaluating physicochemical conditions, trophic dynamics, and potential  
138 pollution signals in riverine systems.

139

## 140 *2.2. Precipitation and climatological events*

141 The regional climate is humid tropical, with a marked seasonal cycle composed  
142 of a rainy season and a less rainy season, which is characteristic of the eastern Amazon.  
143 Monthly precipitation data for 2022–2024 were compiled from records available through  
144 the National Institute of Meteorology (INMET) and the National Water and Basic  
145 Sanitation Agency (ANA). A regional monthly precipitation index was calculated as the  
146 mean of available records for the study area in Pará State. This index was compared with  
147 the climatological normal for the 1995–2024 period in order to identify interannual  
148 anomalies during the study period. Based on the regional rainfall regime, the rainy season  
149 was defined as the months with the highest precipitation totals, whereas the less rainy  
150 season comprised the months with the lowest rainfall values.

151 *2.3. Water quality classification and parameters*

152 The Brazilian National Environmental Council Resolution No. 357/2005  
 153 establishes the classification of surface water bodies and defines limits for physical,  
 154 chemical, and biological parameters according to their intended uses. In this study, the  
 155 monitored sites were classified as Class 2 freshwater, intended for multiple uses,  
 156 including human consumption after conventional treatment, protection of aquatic life,  
 157 secondary contact recreation, irrigation, and animal watering (CONAMA, 2005).

158 For this class, the legal limits adopted as reference were: dissolved oxygen ( $DO \geq$   
 159  $5.0 \text{ mg L}^{-1}$ ), pH between 6.0 and 9.0, turbidity  $\leq 100 \text{ NTU}$ , total phosphorus  $\leq 0.030 \text{ mg}$   
 160  $\text{L}^{-1}$  in rivers with low turbulence, and chlorophyll-a concentrations  $\leq 30 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ . These  
 161 thresholds were used as reference values to interpret the observed water quality conditions  
 162 and identify potential environmental implications for the evaluated aquatic systems.

163

164 *2.4. Trophic State Index (TSI)*

165 The eutrophication process was evaluated using the Trophic State Index (TSI)  
 166 proposed by Lamparelli (2004) and adopted by CETESB (2021), which uses total  
 167 phosphorus (TP) and chlorophyll-a (CL) concentrations as indicators of trophic status.

168

$$169 \quad TSI (TP) = 10 \times \left( 6 - \frac{0.42 - 0.36 \ln (TP)}{\ln 2} \right) - 20$$

170

$$171 \quad TSI (CL) = 10 \times \left( 6 - \frac{-0.7 - 0.6 \ln (CL)}{\ln 2} \right) - 20$$

172 where:

173 TP = total phosphorus ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )

174 CL = chlorophyll-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )

175 ln = natural logarithm

176 The final TSI value was calculated as the arithmetic mean of both parameters:

177

$$178 \quad TSI = \frac{TSI(TP) + TSI(CL)}{2}$$

179

180 The trophic classification (**Table 1**) followed the Carlson model modified by  
181 Lamparelli (2004).

182

183 **Table 1.** Classification of the Trophic State.

184

185 *2.5. Comprehensive Pollution Index (CPI)*

186 The Comprehensive Pollution Index (CPI) was used to evaluate the overall  
187 pollution status of the monitored river sections by integrating multiple physicochemical  
188 parameters into a single indicator. This index allows the comparison between measured  
189 concentrations and regulatory standards, providing an integrated assessment of water  
190 quality conditions (Mekonnen & Tekeba, 2024).

191 In this study, the CPI was calculated using three water quality parameters:  
192 dissolved oxygen (DO), turbidity, and total phosphorus (TP). The reference values  
193 adopted for each parameter were based on the limits established for Class 2 freshwater  
194 bodies according to CONAMA Resolution No. 357/2005.

195 The pollution index for each parameter ( $P_i$ ) was calculated as the ratio between  
196 the measured concentration ( $C_i$ ) and the corresponding regulatory standard ( $S_i$ ):

$$197 \quad P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

198 where:

199  $P_i$  = pollution index of parameter  $i$

200  $C_i$  = measured concentration of parameter  $i$

201  $S_i$  = regulatory standard value for parameter  $i$

202 For dissolved oxygen, the inverse ratio was used because higher concentrations  
203 indicate better water quality:

$$204 \quad P_i = \frac{S_i}{C_i}$$

205

206 The overall CPI value was then calculated as the arithmetic mean of the individual  
207 pollution indices:

$$208 \quad CPI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

209

210 where  $n$  represents the total number of analyzed parameters ( $n = 3$ ). To account for the  
211 strong hydrological seasonality typical of the eastern Amazon, CPI values were also  
212 evaluated according to seasonal hydrological periods, allowing the comparison between  
213 rainy and dry seasons. This approach helps to reduce the influence of dilution effects and  
214 sediment mobilization associated with seasonal variations in river discharge.

215 The pollution levels derived from CPI values were interpreted according to the  
216 classification presented in **Table 2**.

217

218 **Table 2.** Classification of the Comprehensive Pollution Index (CPI).

219

220 *2.6. Land-use and land-cover analysis*

221 Land-use and land-cover (LULC) data were obtained from the MapBiomass  
222 Project (Collection 10), which provides annual land-cover maps for Brazil derived from  
223 Landsat satellite imagery with a spatial resolution of 30 m (Souza et al., 2020).

224 To evaluate potential landscape influences on water quality, circular buffer zones  
225 with a radius of 5 km were generated around each monitoring site in order to characterize  
226 the surrounding landscape composition influencing the monitored river sections. This  
227 spatial approach was used to characterize the landscape immediately surrounding each  
228 monitoring site and to provide environmental context for interpreting local water quality  
229 patterns.

230 Within each buffer area, the proportional coverage of the main land-use classes  
231 was quantified, including forest formation, pasture, agriculture, urban infrastructure, and  
232 water bodies. These classes were selected due to their potential influence on hydrological  
233 processes such as runoff generation, erosion, and nutrient transport to river systems.

234 The resulting land-use metrics were used to provide environmental context for  
235 interpreting spatial patterns in water quality parameters and indices, including the Trophic  
236 State Index (TSI) and the Comprehensive Pollution Index (CPI).

237

### 238 *2.7. Statistical analysis*

239 The data were analyzed using descriptive statistics (minimum, maximum, mean,  
240 and standard deviation). Normality was assessed using the Shapiro–Wilk test. Due to the  
241 absence of normal distribution, Spearman’s correlation coefficient ( $p \leq 0.05$ ) was applied  
242 to evaluate associations among variables.

243 Correlation strength was classified as weak ( $0 < r < 0.4$ ), moderate ( $0.4 < r < 0.7$ ),  
244 and strong ( $0.7 < r < 1.0$ ). To identify seasonal influences and interannual variability  
245 (2022–2024), Interannual and seasonal differences were evaluated using the Kruskal–

246 Wallis test followed by Dunn's post hoc test ( $p \leq 0.05$ ). Principal Component Analysis  
247 (PCA) was performed using standardized variables in order to account for differences in  
248 measurement scales among parameters. All statistical analyses were performed using R  
249 software version 4.3.2.

250

### 251 **3. Results**

#### 252 *3.1 Hydroclimatic conditions during the study period*

253         Precipitation patterns during 2022–2024 reflected the typical hydroclimatic  
254 regime of the eastern Amazon, characterized by a well-defined rainy season and a less  
255 rainy period (**Fig. 3**). The highest rainfall levels generally occurred between January and  
256 April, whereas the lowest monthly totals were recorded between June and September.  
257 Interannual variability was also evident. In 2023, precipitation showed the greatest  
258 monthly amplitude, including a marked peak in March, whereas 2022 displayed high  
259 rainfall in January, March, and November. In 2024, rainfall followed an intermediate  
260 pattern, with moderate peaks in March and December. These differences indicate that the  
261 study period encompassed distinct hydroclimatic conditions that likely influenced runoff  
262 and riverine transport processes.

263

264 **Fig. 3.** Seasonal variation of precipitation (mm) in the Tocantins–Araguaia River Basin  
265 between 2022 and 2024. Sources: ANA; INMET (2024).

266

#### 267 *3.2 Water quality variability in the Tocantins–Araguaia Basin*

268         The physicochemical and biological parameters analyzed in the Tocantins–  
269 Araguaia Basin exhibited considerable variability during the study period. Descriptive  
270 statistics indicated differences among sampling sites and sampling periods, reflecting the

271 influence of hydrological conditions and local environmental characteristics on water  
272 quality (**Table 3**). In general, the observed values were consistent with the typical  
273 characteristics of river systems in the eastern Amazon.

274

275 **Table 3.** Descriptive statistics (Min. = Minimum, Max. = Maximum, SD = Standard  
276 deviation) of surface water parameters in the Tocantins-Araguaia Basin, in the years  
277 2022, 2023 and 2024, with a number of data equal to 28 for all parameters in the years  
278 studied. EC = electrical conductivity, TDS = total dissolved solids, DO = dissolved  
279 oxygen.

280

281 Most parameters remained within the limits established for Class 2 freshwater  
282 according to the Brazilian environmental regulation (CONAMA Resolution No.  
283 357/2005). However, variations were observed for some variables, particularly turbidity,  
284 total phosphorus, and chlorophyll-a, which showed higher values during certain sampling  
285 periods. These variations indicate temporal fluctuations in sediment transport, nutrient  
286 availability, and biological productivity within the basin.

287 Interannual differences are summarized in **Table 3**, while seasonal contrasts for  
288 each year are presented in **Tables 4–6**. These variations reflect differences in  
289 hydroclimatic conditions and hydrological responses across the study period.

290

291 **Table 4.** Descriptive statistics (Min. = Minimum, Max. = Maximum, SD = Standard  
292 deviation) of the less rainy and rainy periods for the year 2022, of abiotic parameters and  
293 chlorophyll a in the surface water of the Tocantins-Araguaia Basin.

294

295 Seasonal patterns were also evident when comparing the rainy and less rainy  
296 periods (**Tables 5 and 6**). In general, higher turbidity values were observed during the

297 rainy season, likely associated with increased surface runoff and sediment transport to  
298 river channels. In contrast, some dissolved parameters showed relatively stable values  
299 between seasons. These results indicate that seasonal hydrological dynamics play an  
300 important role in controlling water quality variability in the Tocantins–Araguaia Basin.

301

302 **Table 5.** Descriptive statistics (Min. = Minimum, Max. = Maximum, SD = Standard  
303 deviation) of the less rainy and rainy periods for the year 2023, of abiotic parameters and  
304 chlorophyll a in the surface water of the Tocantins-Araguaia Basin.

305

306 **Table 6.** Descriptive statistics (Min. = Minimum, Max. = Maximum, SD = Standard  
307 deviation) of the less rainy and rainy periods for the year 2024, of abiotic parameters and  
308 chlorophyll a in the surface water of the Tocantins-Araguaia Basin.

309

### 310 *3.3 Trophic state patterns (TSI)*

311 The Trophic State Index (TSI) calculated for the Tocantins–Araguaia Basin  
312 indicated moderate variability in trophic conditions during the study period (**Table 2**).  
313 TSI values ranged from 46.67 to 76.00, with mean annual values of 52.39 in 2022, 50.69  
314 in 2023, and 52.04 in 2024.

315 According to the trophic classification adopted in this study, most observations  
316 were classified as oligotrophic to mesotrophic, indicating generally good water quality  
317 conditions and moderate nutrient availability in the monitored river sections. However,  
318 the observed range of TSI values also included occasional eutrophic and hypereutrophic  
319 conditions, reflecting localized increases in nutrient concentrations and phytoplankton  
320 biomass.

321 Higher TSI values were particularly recorded in 2024, suggesting episodic

322 increases in nutrient availability and primary productivity. These variations are consistent  
323 with the fluctuations observed in total phosphorus and chlorophyll-a concentrations and  
324 likely reflect seasonal hydrological processes that influence nutrient transport and  
325 biological production in the basin.

326         The seasonal analysis of the Trophic State Index revealed slight variations  
327 between hydrological periods throughout the study years (**Tables 3, 4 and 5**). In 2022,  
328 the mean TSI increased from 51.92 during the less rainy period to 52.86 in the rainy  
329 season. In 2023, the index remained relatively stable between seasons, with mean values  
330 of 50.81 and 50.58 for the less rainy and rainy periods, respectively. In 2024, a similar  
331 pattern to 2022 was observed, with mean TSI values rising from 51.22 in the less rainy  
332 period to 52.87 during the rainy season.

333         Overall, these results indicate a slight tendency for higher trophic index values  
334 during the rainy period in some years, suggesting that increased runoff and sediment  
335 transport may contribute to greater nutrient availability and phytoplankton biomass in the  
336 basin. However, the relatively small differences between seasons indicate that the trophic  
337 status of the Tocantins–Araguaia Basin remains generally stable across hydrological  
338 periods.

339

340

#### 341 *3.4 Integrated pollution assessment (CPI)*

342         The Comprehensive Pollution Index (CPI) revealed moderate variability in the  
343 overall pollution status of the Tocantins–Araguaia Basin during the study period (**Table**  
344 **2**). CPI values ranged from 0.36 to 2.14, with mean annual values of 0.71 in 2022, 0.59  
345 in 2023, and 0.73 in 2024. According to the adopted classification criteria, the mean CPI  
346 values for all evaluated years fall within the slightly polluted category, indicating a

347 moderate influence of physicochemical alterations on water quality.

348         Among the evaluated years, 2023 presented the lowest mean CPI value,  
349 suggesting comparatively better environmental conditions during that period. In contrast,  
350 2022 and 2024 showed slightly higher CPI values, reflecting greater variability in  
351 turbidity and total phosphorus concentrations. The highest CPI value recorded in the  
352 dataset occurred in 2024 (2.14), indicating a localized event of severe pollution influence  
353 according to the index classification. These variations highlight the episodic nature of  
354 water quality changes in large tropical river systems.

355         Seasonal analysis of the Comprehensive Pollution Index indicated relatively small  
356 differences between hydrological periods throughout the study years (**Tables 3, 4 and 5**).  
357 In 2022, the mean CPI values were 0.72 during the less rainy period and 0.70 in the rainy  
358 season, indicating minimal seasonal variation. In 2023, CPI values increased slightly from  
359 0.55 in the less rainy period to 0.62 during the rainy season. In 2024, the index remained  
360 relatively stable between seasons, with mean values of 0.73 and 0.74 for the less rainy  
361 and rainy periods, respectively.

362         Overall, the results suggest that although seasonal hydrological dynamics  
363 influence individual physicochemical parameters such as turbidity and phosphorus  
364 concentrations, the integrated pollution status represented by CPI remained relatively  
365 stable between hydrological periods. This pattern indicates that the overall water quality  
366 of the Tocantins–Araguaia Basin is influenced by episodic variations rather than strong  
367 seasonal shifts.

368

### 369 *3.5 Multivariate relationships among environmental variables and land-use patterns*

370         These data provide regional landscape context for interpreting long-term  
371 environmental pressures in the Pará sector of the Tocantins–Araguaia Basin between

372 1985 and 2024 (**Fig. 4**). Over this period, forest cover showed a continuous decline, while  
373 areas associated with agriculture and pasture expanded steadily.  
374 Despite this trend, forest formations still occupy a substantial portion of the basin,  
375 indicating that the landscape remains characterized by a mosaic of natural vegetation and  
376 anthropogenic land use.

377 **Fig. 4.** Temporal evolution of forest cover and agriculture/pasture areas in the study  
378 region from 1985 to 2024, highlighting the progressive decline of native vegetation and  
379 the expansion of anthropogenic land use, based on MapBiomas Collection 10.

380

381 The Shapiro–Wilk test indicated that most variables did not follow a normal  
382 distribution ( $p \leq 0.05$ ), except for pH ( $p > 0.05$ ). These results justified the use of non-  
383 parametric statistical methods for subsequent analyses.

384 The Kruskal–Wallis test revealed significant interannual differences for total  
385 dissolved solids (TDS), electrical conductivity (EC), pH, and turbidity ( $p \leq 0.05$ ),  
386 indicating that these variables were influenced by temporal variability during the study  
387 period. In contrast, no significant differences were observed for dissolved oxygen, total  
388 phosphorus, chlorophyll-a, TSI, and CPI ( $p > 0.05$ ), suggesting relative stability of trophic  
389 and pollution-related parameters across years.

390 These interannual differences are consistent with the observed variability in  
391 precipitation patterns, particularly the higher rainfall recorded in 2023, which likely  
392 contributed to changes in turbidity and dissolved solids through increased runoff and  
393 sediment input.

394 Post hoc Dunn tests revealed that turbidity differed significantly between 2022  
395 and 2023 ( $p \leq 0.05$ ) and between 2023 and 2024 ( $p \leq 0.05$ ), highlighting 2023 as a distinct  
396 year. Total dissolved solids (TDS) and electrical conductivity (EC) showed significant

397 differences only between 2023 and 2024 ( $p \leq 0.05$ ), while pH differed significantly  
398 between 2022 and 2023 ( $p \leq 0.05$ ). These patterns are illustrated in **Fig. 5** and are  
399 consistent with the observed precipitation variability, particularly the higher rainfall in  
400 2023.

401

402 **Fig. 5.** Violin and boxplots of total dissolved solids (TDS), electrical conductivity (EC),  
403 pH, and turbidity in the Tocantins–Araguaia Basin during 2022–2024. Different letters  
404 indicate significant differences among years according to Dunn’s post hoc test after  
405 Kruskal–Wallis analysis ( $p \leq 0.05$ ).

406 Spearman’s correlation analysis revealed significant relationships among the  
407 evaluated physicochemical and trophic variables (**Fig. 6**). Strong positive correlations  
408 were observed between the Comprehensive Pollution Index (CPI) and total phosphorus  
409 (TP) ( $r = 0.95$ ), as well as between CPI and the Trophic State Index (TSI) ( $r = 0.84$ ),  
410 indicating that nutrient enrichment plays a central role in determining the overall pollution  
411 status of the studied river sections.

412 TSI also showed a strong positive correlation with TP ( $r = 0.84$ ) and a moderate  
413 correlation with chlorophyll-a (Chl-a) ( $r = 0.59$ ), reinforcing the influence of phosphorus  
414 availability on trophic dynamics and phytoplankton biomass. Turbidity exhibited a  
415 moderate positive correlation with CPI ( $r = 0.60$ ) and TP ( $r = 0.41$ ), suggesting that  
416 suspended particulate matter contributes to nutrient transport and pollution levels.

417 In contrast, dissolved oxygen (DO) showed weak correlations with most variables,  
418 indicating a limited direct response to the physicochemical gradients observed in this  
419 study. Total dissolved solids (TDS) and electrical conductivity (EC) were moderately  
420 correlated ( $r = 0.62$ ), reflecting the contribution of dissolved ions to conductivity patterns.

421 Overall, the results highlight that nutrient-related variables, particularly total

422 phosphorus, are the primary drivers of both trophic status and integrated pollution levels  
423 in the Tocantins–Araguaia Basin.

424

425 **Fig. 6.** Spearman correlation matrix among physicochemical parameters, trophic state  
426 index (TSI), and comprehensive pollution index (CPI) in the Tocantins–Araguaia Basin  
427 (Pará, Brazil). Color intensity represents the strength and direction of correlations,  
428 ranging from  $-1$  (negative correlation) to  $+1$  (positive correlation). Only significant  
429 correlations ( $p \leq 0.05$ ) are displayed.

430

431 Principal Component Analysis (PCA) revealed clear patterns in the relationships  
432 among physicochemical variables and their temporal variability across the study period  
433 (**Fig. 7**). The first two principal components explained 50.7% of the total variance, with  
434 PC1 accounting for 33.5% and PC2 for 17.2%.

435 PC1 was primarily associated with variables related to dissolved solids and  
436 nutrient enrichment, showing strong positive loadings for total dissolved solids (TDS),  
437 electrical conductivity (EC), turbidity, total phosphorus (TP), chlorophyll-a (Chl-a), and  
438 the Trophic State Index (TSI). This axis represents a gradient of increasing particulate  
439 matter and nutrient availability, reflecting the influence of runoff and sediment transport  
440 processes in the basin.

441 PC2 was mainly influenced by dissolved oxygen (DO) and pH, indicating a  
442 secondary gradient related to water column conditions and biogeochemical processes.  
443 The opposite orientation of DO relative to nutrient-related variables suggests distinct  
444 environmental controls between oxygen dynamics and nutrient enrichment.

445 The distribution of samples revealed partial separation among years. Samples  
446 from 2024 tended to be associated with higher values of TDS, EC, turbidity, and nutrient-

447 related variables along the positive side of PC1, indicating greater influence of particulate  
448 and dissolved inputs. In contrast, 2023 samples were more concentrated on the negative  
449 side of PC1, suggesting relatively lower levels of these parameters. The year 2022  
450 exhibited an intermediate pattern, with broader dispersion across both axes.

451 Overall, the PCA highlights that interannual variability in water quality within the  
452 Tocantins–Araguaia Basin is primarily driven by changes in suspended material and  
453 nutrient dynamics, likely influenced by hydroclimatic conditions and seasonal runoff  
454 patterns.

455

456 **Fig. 7.** Principal Component Analysis (PCA) biplot showing the relationships among  
457 physicochemical variables and the distribution of samples according to year (2022–2024)  
458 in the Tocantins–Araguaia Basin (Pará, Brazil). Arrows represent variable loadings, while  
459 points correspond to individual samples. Ellipses indicate the 95% confidence intervals  
460 for each year. The first two principal components explain 33.5% (PC1) and 17.2% (PC2)  
461 of the total variance.

462

463

#### 464 **4. Discussion**

##### 465 *4.1 Hydroclimatic control on water quality variability*

466 Hydroclimatic variability plays a fundamental role in regulating water quality  
467 patterns in large tropical river systems such as the Tocantins–Araguaia Basin. The marked  
468 seasonal rainfall regime of the eastern Amazon controls river discharge, sediment  
469 transport, and nutrient fluxes, thereby influencing physicochemical conditions and  
470 biogeochemical processes in aquatic environments (Meybeck, 2003; Marengo et al.,  
471 2011).

472           The precipitation patterns observed during the study period (2022–2024) reflect  
473 the typical hydrological seasonality of the region, with a well-defined rainy season  
474 associated with increased runoff and a less rainy period characterized by reduced river  
475 discharge. These hydrological fluctuations directly affect dilution capacity, sediment  
476 mobilization, and nutrient transport, leading to temporal variability in water quality  
477 parameters. Increased precipitation enhances surface runoff and promotes the transport  
478 of suspended particles and associated nutrients into river channels, whereas lower rainfall  
479 conditions tend to reduce dilution and may concentrate dissolved constituents (Allan and  
480 Castillo, 2007; Davidson et al., 2012).

481           In addition to seasonal variability, interannual differences in hydroclimatic  
482 conditions were likely influenced by large-scale climatic anomalies associated with the  
483 El Niño–Southern Oscillation (ENSO). The study period encompassed contrasting  
484 phases, including La Niña conditions in 2022 and the onset of El Niño during 2023–2024,  
485 which are known to alter precipitation patterns and hydrological responses across the  
486 Amazon Basin (Marengo et al., 2011; Jiménez-Muñoz et al., 2016). La Niña events are  
487 typically associated with increased rainfall and enhanced river discharge, while El Niño  
488 conditions tend to promote drier conditions and reduced flow in northern Amazonian  
489 regions.

490           These hydroclimatic differences are consistent with the observed interannual  
491 variability in turbidity, TDS, and EC, suggesting that rainfall variability influenced  
492 sediment mobilization and the transport of particulate and dissolved materials. Such  
493 patterns reflect the strong coupling between precipitation-driven hydrological processes  
494 and the transport of particulate and dissolved materials in river systems (Meybeck, 2003;  
495 Allan and Castillo, 2007).

496           Despite these variations, trophic state (TSI) and integrated pollution levels (CPI)

497 showed relatively limited interannual variability, suggesting that large river systems such  
498 as the Tocantins–Araguaia Basin may exhibit a certain buffering capacity against short-  
499 term hydroclimatic fluctuations. This resilience may be related to the high discharge,  
500 mixing processes, and spatial heterogeneity characteristic of large tropical rivers, which  
501 tend to dampen abrupt changes in nutrient concentrations and overall water quality  
502 (Meybeck, 2003).

503 Overall, the results indicate that hydroclimatic variability, particularly  
504 precipitation and associated runoff processes, represents the primary driver of temporal  
505 changes in water quality in the study area. Seasonal and interannual fluctuations in rainfall  
506 influence sediment transport and nutrient dynamics, thereby shaping the physicochemical  
507 structure of the river system and controlling the variability of key water quality  
508 parameters.

509

#### 510 *4.2 Nutrient dynamics and trophic state responses*

511 Nutrient dynamics in large tropical river systems are primarily controlled by the  
512 interaction between hydrological processes and biogeochemical cycling, with phosphorus  
513 playing a key role in regulating trophic conditions. In the Tocantins–Araguaia Basin, the  
514 observed relationships among total phosphorus (TP), chlorophyll-a (Chl-a), and the  
515 Trophic State Index (TSI) indicate that phosphorus availability is a major driver of  
516 primary productivity and eutrophication patterns.

517 The strong positive correlation between TP and TSI, as well as the moderate  
518 association between TSI and Chl-a, reinforces the well-established the central role of  
519 phosphorus in regulating trophic responses in freshwater ecosystems, particularly in  
520 riverine environments where nutrient inputs are closely linked to watershed processes  
521 (Dodds et al., 1998; Smith and Schindler, 2009). These relationships suggest that

522 variations in phosphorus concentrations directly influence phytoplankton biomass and  
523 trophic state conditions in the study area.

524         Despite these associations, the relatively stable TSI values observed across years  
525 and hydrological periods indicate that trophic conditions in the Tocantins–Araguaia Basin  
526 remain predominantly within oligotrophic to mesotrophic ranges. This limited variability  
527 suggests that large river systems may exhibit resilience to short-term fluctuations in  
528 nutrient inputs, due to factors such as high discharge, continuous water renewal, and  
529 longitudinal mixing processes, which can reduce the accumulation of phytoplankton  
530 biomass and prevent persistent eutrophication (Allan and Castillo, 2007; Meybeck, 2003).

531         Seasonal hydrological dynamics also play an important role in controlling nutrient  
532 availability. During the rainy season, increased surface runoff enhances the transport of  
533 phosphorus from surrounding catchments into river channels, often associated with soil  
534 erosion and particulate matter mobilization. However, this increase in nutrient input may  
535 be partially offset by dilution effects resulting from higher discharge, leading to relatively  
536 moderate changes in trophic state conditions (Davidson et al., 2012). Conversely, during  
537 less rainy periods, reduced dilution can promote higher concentrations of dissolved  
538 nutrients, although lower runoff may limit external nutrient inputs.

539         The relationship between nutrient dynamics and the Comprehensive Pollution  
540 Index (CPI) further highlights the importance of phosphorus in determining overall water  
541 quality. The strong association between TP and CPI indicates that nutrient enrichment  
542 contributes not only to trophic status but also to the integrated assessment of pollution  
543 levels. This reinforces the idea that phosphorus acts as a key indicator linking  
544 eutrophication processes and broader physicochemical alterations in aquatic systems  
545 (Mekonnen and Tekeba, 2024).

546         Overall, the results suggest that nutrient dynamics in the Tocantins–Araguaia

547 Basin are strongly influenced by hydrological variability and watershed processes, with  
548 phosphorus playing a central role in controlling trophic conditions. However, the relative  
549 stability of TSI values indicates that the system does not exhibit persistent eutrophication,  
550 likely due to the buffering capacity of large tropical rivers and the dynamic nature of  
551 hydrological processes in the region.

552

#### 553 *4.3 Role of suspended particles and sediment transport*

554         Suspended particles and sediment transport play a central role in controlling water  
555 quality variability in large tropical river systems, particularly in regions influenced by  
556 strong hydrological seasonality such as the eastern Amazon. In the Tocantins–Araguaia  
557 Basin, turbidity, total dissolved solids (TDS), and electrical conductivity (EC) emerged  
558 as key variables reflecting the influence of sediment dynamics and material transport  
559 processes.

560         The significant interannual differences observed for turbidity, TDS, and EC  
561 indicate that these parameters are highly sensitive to variations in hydrological conditions,  
562 especially those associated with precipitation and surface runoff. Increased rainfall  
563 enhances erosion processes and promotes the mobilization of suspended sediments from  
564 surrounding catchments into river channels, thereby elevating turbidity levels and  
565 influencing the transport of both particulate and dissolved materials (Foley et al., 2005;  
566 Meybeck, 2003).

567         These patterns are strongly supported by the PCA results, in which turbidity, TDS,  
568 and EC showed high loadings along the first principal component (PC1), representing the  
569 dominant gradient of variability in the dataset. This axis reflects the combined influence  
570 of suspended particles and dissolved solids, indicating that sediment transport processes  
571 are the primary drivers of physicochemical variability in the study area. The association

572 of total phosphorus (TP), chlorophyll-a (Chl-a), and the Trophic State Index (TSI) with  
573 this gradient further suggests that nutrient dynamics are closely linked to the transport of  
574 particulate matter.

575 In tropical river systems, suspended sediments often act as carriers of nutrients,  
576 particularly phosphorus, which can be adsorbed onto particle surfaces and transported  
577 downstream during high-flow conditions (Foley et al., 2005; Davidson et al., 2012). This  
578 coupling between sediment transport and nutrient dynamics explains the observed  
579 relationships between turbidity and nutrient-related variables, as well as their joint  
580 contribution to the main axis of variability identified in the PCA.

581 The observed temporal patterns also reflect the influence of hydrological  
582 variability on sediment dynamics. Periods of increased discharge are typically associated  
583 with higher sediment loads due to intensified runoff and channel erosion, while lower  
584 flow conditions favor sediment settling and reduced turbidity levels. These processes  
585 contribute to the spatial and temporal heterogeneity of water quality in large river systems  
586 and are particularly pronounced in regions subject to strong seasonal rainfall regimes  
587 (Meybeck, 2003; Allan and Castillo, 2007).

588 Overall, the results indicate that sediment transport processes appear to be the  
589 dominant mechanism controlling water quality variability during the study period. The  
590 strong influence of suspended particles on both physicochemical parameters and nutrient  
591 dynamics highlights the importance of considering sediment-related processes when  
592 assessing water quality and ecological conditions in large tropical river systems.

593

#### 594 *4.4 Influence of land-use dynamics on water quality*

595 Land-use and land-cover changes play an important role in shaping hydrological  
596 processes and, consequently, water quality in large tropical river basins. In the Tocantins–

597 Araguaia Basin, the progressive expansion of agricultural activities and pasturelands,  
598 combined with reduced forest cover, may have contributed to changes in sediment and  
599 nutrient dynamics over recent decades, as indicated by MapBiomas data. These regional  
600 land-use trends likely interact with rainfall-driven runoff and erosion processes,  
601 enhancing the transfer of suspended sediments and associated nutrients to river channels.

602         The conversion of natural vegetation to agricultural and pasture areas alters key  
603 hydrological processes, including infiltration, evapotranspiration, and surface runoff.  
604 These changes tend to increase soil erosion and enhance the export of suspended  
605 sediments and associated nutrients to river systems, thereby affecting turbidity, dissolved  
606 solids, and nutrient concentrations (Foley et al., 2005; Davidson et al., 2012). Such  
607 processes are particularly relevant in tropical regions, where intense rainfall events can  
608 amplify the mobilization of materials from disturbed catchments.

609         The influence of land-use dynamics is consistent with the observed relationships  
610 between suspended particles, nutrient variables, and water quality indices. The strong  
611 association between turbidity, total phosphorus (TP), and the Comprehensive Pollution  
612 Index (CPI), as well as their contribution to the main gradient identified in the PCA,  
613 suggests that landscape changes may enhance the transport of particulate-bound nutrients.  
614 In this context, agricultural expansion and deforestation can act as amplifying factors of  
615 natural hydrological processes, intensifying the transfer of sediments and nutrients to  
616 aquatic systems.

617         Despite these landscape transformations, the relatively stable values of TSI and  
618 CPI indicate that the overall water quality of the Tocantins–Araguaia Basin has not  
619 undergone severe degradation during the study period. This apparent stability may be  
620 related to the large spatial scale of the basin, the presence of remaining forested areas,  
621 and the high discharge capacity of the river system, which can promote dilution and

622 reduce the accumulation of pollutants (Meybeck, 2003; Allan and Castillo, 2007).

623         It is important to note, however, that continued expansion of anthropogenic land  
624 use may increase pressure on aquatic systems in the long term. The combined effects of  
625 deforestation, agricultural intensification, and climate variability can lead to cumulative  
626 impacts on sediment transport, nutrient loading, and water quality, potentially shifting the  
627 system toward more degraded conditions.

628         Overall, land-use dynamics in the Tocantins–Araguaia Basin act as an important  
629 modulating factor of water quality, interacting with hydroclimatic variability to influence  
630 sediment and nutrient fluxes. The results highlight the need for integrated watershed  
631 management strategies that consider both climatic drivers and landscape transformations  
632 to ensure the long-term sustainability of water resources in the eastern Amazon.

633

634

635

## 636 **5. Conclusion**

637         This study evaluated the influence of hydroclimatic variability and land-use  
638 dynamics on water quality in the Tocantins–Araguaia Basin (Pará, Brazil) using an  
639 integrated approach based on physicochemical parameters, the Trophic State Index (TSI),  
640 and the Comprehensive Pollution Index (CPI).

641         The results indicate that hydroclimatic variability was the main driver of water  
642 quality dynamics during the study period, with precipitation and associated runoff  
643 processes controlling sediment transport, nutrient fluxes, and physicochemical  
644 conditions. Interannual differences were mainly observed in turbidity, total dissolved  
645 solids, and electrical conductivity, reflecting the sensitivity of particulate and dissolved  
646 material transport to hydrological fluctuations.

647 Nutrient dynamics were strongly influenced by total phosphorus, which showed a  
648 central role in regulating trophic conditions and overall pollution status, as evidenced by  
649 its strong association with both TSI and CPI. Despite these relationships, trophic  
650 conditions remained predominantly within oligotrophic to mesotrophic ranges, indicating  
651 the absence of persistent eutrophication.

652 Multivariate analyses highlighted that sediment transport processes appear to be a  
653 dominant mechanism controlling water quality variability, with suspended particles  
654 acting as key vectors for nutrient transport. The PCA results confirmed that turbidity,  
655 dissolved solids, and nutrient-related variables define the main gradient of environmental  
656 variation in the basin.

657 Land-use dynamics, particularly the expansion of agriculture and pasturelands,  
658 were identified as important factors that may enhance sediment and nutrient inputs to  
659 river systems. However, the overall stability of TSI and CPI suggests that the basin still  
660 maintains a certain buffering capacity, likely due to its large spatial scale, hydrological  
661 connectivity, and remaining forest cover.

662 Overall, the findings highlight the importance of integrating hydroclimatic  
663 variability, sediment transport, and land-use dynamics to understand water quality  
664 patterns in large tropical river systems. This integrated perspective is essential for  
665 supporting effective water resource management and for anticipating potential impacts of  
666 climate variability and land-use change in the eastern Amazon.

667

668 **Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the manuscript**  
669 **preparation process:** During the preparation of this work, the author, Maria de Lourdes  
670 Souza Santos, used AI-assisted tools for the creation of the graphical abstract and Figure  
671 1. After using these tools, the author critically reviewed and edited the content as

672 necessary and takes full responsibility for the content of the published article.

673

674 **Acknowledgments:** This research was conducted with the support of the Coordination  
675 for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES), through a  
676 scholarship granted to student Adriana da Cruz Melo.

677

## 678 **References**

679 Allan, J.D., Castillo, M.M., 2007. *Stream ecology: structure and function of running*  
680 *waters*, 2nd ed. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5583-6>

681 ANA, 2023. Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas (PNQA). Agência  
682 Nacional de Águas e Saneamento Básico, Brasília.

683 ANA, 2024. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Agência Nacional de Águas e  
684 Saneamento Básico, Brasília.

685 Carlson, R.E., 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22, 361–369.  
686 <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>

687 CETESB, 2021. Índice de estado trófico das águas interiores do Estado de São Paulo.  
688 Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, São Paulo.

689 CONAMA, 2005. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio  
690 Ambiente, Brasília.

691 Davidson, E.A., de Araújo, A.C., Artaxo, P., Balch, J.K., Brown, I.F., Bustamante,  
692 M.M.C., Coe, M.T., DeFries, R.S., Keller, M., Longo, M., Munger, J.W., Schroeder, W.,  
693 Soares-Filho, B.S., Souza Jr., C.M., Wofsy, S.C., 2012. The Amazon basin in transition.  
694 *Nature* 481, 321–328. <https://doi.org/10.1038/nature10717>

- 695 Dodds, W.K., Jones, J.R., Welch, E.B., 1998. Suggested classification of stream trophic  
696 state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and  
697 phosphorus. *Water Res.* 32, 1455–1462. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00370-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00370-9)
- 698 Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin,  
699 F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A.,  
700 Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K.,  
701 2005. Global consequences of land use. *Science* 309, 570–574.  
702 <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- 703 INMET, 2024. Instituto Nacional de Meteorologia. Meteorological data for the eastern  
704 Amazon region. Brasília.
- 705 Jiménez-Muñoz, J.C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K.,  
706 Malhi, Y., Sobrino, J.A., van der Schrier, G., 2016. Record-breaking warming and  
707 extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Sci.*  
708 *Rep.* 6, 33130. <https://doi.org/10.1038/srep33130>
- 709 Lamparelli, M.C., 2004. *Graus de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo:*  
710 *avaliação dos métodos de monitoramento*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo,  
711 São Paulo.
- 712 Marengo, J.A., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., 2011. The  
713 drought of Amazonia in 2010: a climatic perspective. *Geophys. Res. Lett.* 38, L12702.  
714 <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>
- 715 Mekonnen, Y.A., Tekeba, H.M., 2024. Analysis of water quality by comprehensive  
716 pollution index (CPI) and self-purification capacity of Shinta River, Ethiopia. *Sustain.*  
717 *Water Resour. Manag.* 10, 10. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00996-y>

- 718 Meybeck, M., 2003. Global analysis of river systems: from Earth system controls to  
719 Anthropocene syndromes. *Philos. Trans. R. Soc. B* 358, 1935–1955.  
720 <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1379>
- 721 SEMAS, 2023. Sistema Hidrometeorológico do Estado do Pará. Secretaria de Estado de  
722 Meio Ambiente e Sustentabilidade, Belém.
- 723 Smith, V.H., Schindler, D.W., 2009. Eutrophication science: where do we go from here?  
724 *Trends Ecol. Evol.* 24, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>
- 725 Souza, C.M., Shimbo, J.Z., Rosa, M.R., Parente, L.L., Alencar, A.A., Rudorff, B.F.T.,  
726 Hasenack, H., Matsumoto, M., Ferreira, L.G., Souza-Filho, P.W.M., Oliveira, S.W.,  
727 Rocha, W.F., Fonseca, A.V., Marques, C.B., Diniz, C.G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa,  
728 E.R., Vélez-Martin, E., Weber, E.J., Lenti, F.E.B., Paternost, F.F., Pareyn, F.G.C.,  
729 Siqueira, J.V., Viera, J.L., Neto, L.C.F., Saraiva, M.M., Sales, M.H., Salgado, M.P.G.,  
730 Vasconcelos, R., Galano, S., Mesquita, V.V., Azevedo, T., 2020. Reconstructing three  
731 decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and  
732 Earth Engine. *Remote Sens.* 12, 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- 733