



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL
MESTRADO ACADÊMICO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

RAIMUNDO NONATO SOUSA RAULINO

**AVALIAÇÃO MULTIMODELO DE ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO PARA A
CARACTERIZAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO EM RESERVATÓRIO DO
SEMIÁRIDO TROPICAL: ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO ARARAS**

FORTALEZA - CEARÁ

2023

RAIMUNDO NONATO SOUSA RAULINO

AVALIAÇÃO MULTIMODELO DE ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO PARA A
CARACTERIZAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO EM RESERVATÓRIO DO SEMIÁRIDO
TROPICAL: ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO ARARAS

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinícius Freire Andrade

FORTALEZA – CEARÁ

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Instituto Federal do Ceará - IFCE

Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R245a Raulino, Raimundo Nonato Sousa.

Avaliação multimodelo de Índice de Estado Trófico para a caracterização da eutrofização em reservatório do semiárido tropical : estudo de caso do reservatório Araras / Raimundo Nonato Sousa Raulino. - 2023.
88 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Marcus Vinícius Freire Andrade .

1. Qualidade da água. 2. Condições tróficas. 3. Semiárido. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081, - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

RAIMUNDO NONATO SOUSA RAULINO

“AVALIAÇÃO MULTIMODELO DE ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO PARA A CARACTERIZAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO EM RESERVATÓRIO DO SEMIÁRIDO TROPICAL: ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO ARARAS”

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 28/09/2023

Prof. Dr. **Marcus Vinicius Freire Andrade** (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. **Altair Rosa**
Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)

Profa. Dra. **Mayara Carantino Costa**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Documento assinado eletronicamente por **Marcus Vinicius Freire Andrade, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 11/10/2023, às 14:49, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Mayara Carantino Costa, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 16/10/2023, às 09:04, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Altair Rosa, Usuário Externo**, em 07/11/2023, às 09:49, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **5356098** e o código CRC **160BC02B**.

Ao Meu filho Diogo Eduardo, por quem devo fazer tudo para que ele possa viver plenamente.

À Mamãe, que sob a luz de lamparina, ensinava-me o que sabia, e em jus a seu esforço fundamentei meu intelecto.

Aos irmão João, Michele, Lília, Francisco, Eliane e Leila pelos esforços para mudar nossas realidades.

À minha esposa, que pretendemos ficar juntos até o fim.

À Água, pois foi dela que originalmente viemos, então preservá-la é, além de tudo, afeto.

Ao meu pai, por ter aprendido com ele que existe ocasião que não nos dá uma segunda chance para agir, então as certezas ou achismos alheios devem estar sempre aquém de nossas implacáveis convicções.

À Ciência, que com suas excelsas “ferramentas a maquinaria da vida pode ser compreendida”...

Aos meus bons professores, que me encorajaram a manter a persistência indubitável

À Escrita, por eternizar a história e perpetuar o conhecimento, sem os quais não há fundamento.

Ao meu cachorro, que não importa o tamanho da chuva, ou dia difícil, seu entusiasmo de alegria ao me receber é sempre o mesmo.

Aos Livros, que me ensinaram a ver e a enxergar o horizonte com o mesmo fascínio que Iuri Gararin viu a Terra pela primeira vez.

AGRADECIMENTO

À família, que pelos desígnios da vida é o fundamento que sustenta o que os demais esboçam.
Ao Prof. Marcus Vinícius Freire Andrade designado a conduzir com precisão esta orientação.
Ao Professor Altair Rosa por compor a banca manifestando sua plausibilidade e completudes.
À Professora Mayara Carantino ao compor a banca com entusiasmo e conveniência manifesta.

A propósito, foi minha idiossincrasia que possibilitou que o que aqui estou a finalizar fosse possível, em virtude precípua de minha coragem, ousadia, perspicácia e perseverança, não raro me pego veementemente absorto nessa conjuntura e fico me indagando se outrem teria conseguido, não estou aqui subestimando ou refutando capacidades intelectuais em detrimento de outrem, porém tão-e-somente às dificuldades impostas circunstancial ou convenientemente.

Ou simplesmente porque a vida é circunstancial ou pelas conveniências tão imediatistas, mas o importante é a firmeza de caráter e a força de espírito que mantêm indubitavelmente as mais genuínas convicções nos propósitos verdadeiramente relevantes para as construções pessoas e por extensões para tudo que direta ou indiretamente tenha alguma conexão plausível.

A vida é o que façamos dela, e a minha vida toda busquei sempre o prumo para galgar com maestria tudo o que peremptoriamente me aguardava no porvir, sempre solidificando as melhores ideias sobre as perspectivas mais sublimes imbuído nos mais excelsos princípios com que paradoxalmente satisfazia e incomodava, porque as pessoas são essencialmente diferentes.

Poderia citar uma centena de livros que me tornaram parte do que sou, que me ensinaram a partir da aurora de minha vida de entendimento sobre as questões mais complexas, e até mesmo as mais triviais, que não importa o quão essencialmente você é verdadeiro, ou que suas percepções sejam as mais aguçadas, as conveniências impostas de cima, às vezes, prevalecem.

Não importa se são instituições, pessoas ou entidades, somos igualmente humanos, essa é a condição primária que todo pessoa, que pensa, deve colocar na dianteira de tudo, para que não se incorra em decisões que a si são simplórias, mas que a outrem podem ser veementes.

Enfim, eis o ínfimo que tive que enfrentar: 400km do Instituto e mais 600km da família, 3.000km de viagens indo e voltando por semana, e o compromisso assumido entre mim e meu filho de estar em casa toda semana por um dia, 27 horas precisamente, o que a labuta e o estudo permitiam, do sábado ao domingo, então não teria sido possível se a maioria das aulas não tivessem sido a distância; chega ser o cúmulo do paradoxo dizer que foi a pandemia Covid-19 que deu a cabal oportunidade de realizar este sonho, relato simplório mas vivência veemente de alguém que faz da dificuldade e da injustiça um pilar de vida, sobretudo, grato a mim, pois.

“O Cosmos é tudo que É, ou FOI, ou SERÁ.

A nossa contemplação do Cosmos mexe conosco.

Dar um calafrio na espinha, um bolo na voz, uma sensação de desmaio como uma lembrança distante de cair de uma grande altura.

Sabemos que estamos abordando o maior de todos os mistérios.

O tamanho e a idade do Cosmos estão além do entendimento humano comum.

Perdido em algum lugar entre a imensidão e a eternidade está nosso minúsculo lá planetário: a Terra.

Pela primeira vez temos o poder de decidir o destino de nosso planeta e de nós mesmos.

É um momento de grande perigo, mas a nossa espécie é jovem, curiosa e corajosa, e demonstra muito potencial.

Nos últimos milênios nós fizemos as descobertas mais surpreendentes e inesperadas sobre o Cosmos e sobre nosso lugar nele.

Eu acredito que nosso futuro depende, e muito, de entendermos bem este Cosmos no qual flutuamos como um grão de poeira no céu matinal...”

Cosmos é uma palavra grega que quer dizer ordem do Universo, de certo modo, é o posto de caos, implica em uma profunda interconectividade de todas as coisas, o modo intrincado e sutil como o Universo é reunido.

(Carl Edward Sagan)

RESUMO

O semiárido tropical brasileiro apresenta condições climáticas e hidrológicas bastante peculiares que influenciam na dinâmica dos reservatórios artificiais, intensificando a degradação da qualidade da água, resultando no problema da eutrofização. Conhecer o estado trófico dos corpos d'águas se tornou de grande relevância para a gestão dos recursos hídricos. Os Índices de Estado Trófico se tornaram uma das ferramentas mais utilizadas para conhecer a condição trófica dos corpos hídricos. Esta pesquisa consistiu em aplicar uma avaliação utilizando cinco modelos de Índice de Estado Trófico (IET) para caracterizar o estado trófico do reservatório Araras. Utilizou-se também três modelos de determinação do nutriente limitante para inferir qual o fator limitante da eutrofização do reservatório Araras. Os cinco modelos consistiram na avaliação multimodelo IET para gerar as faixas tróficas de caracterização da eutrofização a qual foi associada ao cálculo probabilístico do Risco de Eutrofização para estabelecer as duas categorias divisórias de condições tróficas que por sua vez serviram para estabelecer o Valor Trófico de Referência para a Escala das Intensidades Trófica proposta, então foi realizada a caracterização da eutrofização do reservatório Araras de 2009 a 2022. Dois modelos de determinação do nutriente limitante resultaram majoritariamente no Nitrogênio como o nutriente limitante. A avaliação multimodelo IET caracterizou o reservatório Araras com intensidade que chegou até ao índice multimodelo 74 na escala proposta, o que corresponde a uma condição trófica em que os usos precisam ser praticamente todos interrompidos, com volume percentual médio chegando a 3,60%, a variável volume percentual foi confirmada como a que mais influenciou na qualidade da água mediante os resultados dos IETs multimodelo. No último biênio de monitoramento o risco de eutrofização apontou para a condição de não-eutrofização com o índice multimodelo 53 de intensidade que caracterizou o reservatório como não-eutrofizado, com alerta por estar próximo ao valor de referência. No geral, o reservatório Araras teve um índice multimodelo 63 que o caracterizou em condição de eutrofização em situação de intensidade trófica preocupante. A abordagem multimodelo integrada ao risco de eutrofização demonstrou ser uma metodologia revolucionária para caracterizar o estado trófico de reservatório do semiárido tropical constituindo uma ferramenta promissora sendo forte aliada ao monitoramento e planejamento dos recursos hídricos devido à objetividade e precisão deve ser utilizada nas tomadas de decisões sobre as questões da água.

Palavras-chave: Qualidade da água. Condições tróficas. Gestão de águas. Semiárido. Planejamento.

ABSTRACT

The Brazilian tropical semi-arid region presents very peculiar climatic and hydrological conditions that influence the dynamics of artificial reservoirs, intensifying the degradation of water quality, resulting in the problem of eutrophication. Knowing the trophic state of water bodies has become of great relevance for the management of water resources. Trophic State Indices have become one of the most used tools to understand the trophic condition of water bodies. This research consisted of applying an assessment using five Trophic State Index (TSI) models to characterize the trophic state of the Araras reservoir. Three models for determining the limiting nutrient were also used to find out the limiting factor for eutrophication of the Araras reservoir. The five models consisted of the IET multi-model assessment to generate the trophic action bands characterized by eutrophication, which was associated with the probabilistic calculation of the Eutrophication Risk to establish the two dividing categories of trophic conditions that in turn served to establish the Trophic Reference Value for the proposed Trophic Intensity Scale, the characterization of the eutrophication of the Araras reservoir was carried out from 2009 to 2022. Two models for determining the limiting nutrient resulted mainly in Nitrogen as the limiting nutrient. The TSI multi-model assessment characterized the Araras reservoir with intensity that reached multi-model index 74 on the proposed scale, which corresponds to a trophic condition in which practically all uses need to be interrupted, with an average percentage volume reaching 3.60%, the The percentage of variable volume was confirmed as the one that most influences water quality through the results of multi-model TSIs. In the last biennium of monitoring, the risk of eutrophication was indicated for the condition of non-eutrophication with the multi-model intensity index 53 that characterized the reservoir as non-eutrophicated, with a warning for being close to the reference value. Overall, the Araras reservoir presented a multi-model index 63 that characterized it as being in a eutrophication condition in a situation of worrying trophic intensity. The integrated multi-model approach to the risk of eutrophication has demonstrated to be a revolutionary methodology for characterizing the trophic state of reservoirs in the tropical semi-arid region, constituting a promising tool, being strong combined with the monitoring and planning of water resources, due to its objectivity and precision, it must be used in decision-making on such as water issues.

Keywords: Water quality. Trophic conditions. Water management. Semi-arid. Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da metodologia com as etapas principais aplicadas nesta pesquisa.....	36
Figura 2 – Localização da bacia do Acaraú com os reservatórios monitorados pela COGERH.....	37
Figura 3 – Localização da bacia de contribuição do reservatório Araras e municípios inseridos.....	38
Figura 4 – Correlação da concentração de NT e da concentração de PT do reservatório Araras	48
Figura 5 – Correlação da concentração de NT e da concentração de Chl- <i>a</i> do reservatório Araras.....	49
Figura 6 – Correlação entre a concentração do NT com as medidas do DS do reservatório Araras.....	49
Figura 7 – Correlação da concentração do PT e concentração de Chl- <i>a</i> do reservatório Araras.....	50
Figura 8 – Correlação entre a concentração do PT e as medidas do DS do reservatório Araras.....	51
Figura 9 – Correlação da concentração da Chl- <i>a</i> e das medidas do DS do reservatório Araras.....	51
Figura 10 – Correlação do volume percentual com o Nitrogênio Total do reservatório Araras.....	53
Figura 11 – Correlação entre o volume percentual do reservatório Araras e a variável Fósforo.....	54
Figura 12 – Correlação entre o volume percentual do reservatório Araras com a Clorofila- <i>a</i>	54
Figura 13 – Correlação entre o volume percentual do reservatório Araras com a variável DS.....	55
Figura 14 – Correlação do volume percentual e os IETs multimodelo do reservatório Araras.....	57
Figura 15 – Correlação entre a variável hidroclimática precipitação com os IETs multimodelo.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios das classificações adotadas pelos cinco IETs de composição da avaliação.....	28
Tabela 2 – Equacionamento dos modelos de determinação dos IETs de composição da avaliação.....	29
Tabela 3 – Classes de estado trófico e respectivas características encontradas no corpo d'água.....	30
Tabela 4 – Principais características e respectivas medidas de operação do reservatório Araras.....	39
Tabela 5 – Demandas hídricas, os municípios e população abastecida pelo reservatório Araras.....	39
Tabela 6 – Modelos dos IETs para a constituição da metodologia de avaliação multimodelo IET.....	41
Tabela 7 – Critérios das metodologias para determinação de nutriente limitante da eutrofização.....	42
Tabela 8 – Dados dos parâmetros NT, PT, Chl- <i>a</i> e DS, volume percentual e precipitação diária.....	44
Tabela 9 – Resultados da estatística descritiva das variáveis avaliadas para o reservatório Araras.....	46
Tabela 10 – Resumo dos resultados das correlações entre as variáveis para o reservatório Araras.....	51
Tabela 11 – A determinação do Nutriente Limitante da eutrofização para o reservatório Araras.....	60
Tabela 12 – A classificação trófica pela avaliação multimodelo IET para o reservatório Araras.....	63
Tabela 13 – Classificação por aporte hídrico da avaliação multimodelo do reservatório Araras.....	67
Tabela 14 – Risco de eutrofização para o reservatório Araras.....	69
Tabela 15 – A Caracterização Trófica do Reservatório Araras pela Avaliação Multimodelo IET.....	73

LISTA DE SIGLAS

Chl-*a* Clorofila-*a*

COGERH Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

CRE Cálculo de Risco de Eutrofização

DS Disco de *Secchi*

EIT Escala de Intensidade Trófica

FDA Função Densidade de Probabilidade

FUNCEME Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

IET Índice de Estado Trófico

Ln Logaritmo neperiano

N Nitrogênio

NT Nitrogênio Total

P Fósforo

PT Fósforo total

SRH Secretária de Recursos Hídricos

VTR Valor Trófico de Referência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo Geral.....	17
2.2	Objetivos Específicos.....	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
3.1	Gestão dos recursos hídricos.....	18
3.2	Qualidade da água e os reservatórios artificiais nas condições semiáridas.....	22
3.2.1	<i>Eutrofização.....</i>	22
3.2.2	<i>Nutriente limitante.....</i>	23
3.2.3	<i>Condições climáticas e antrópicas no processo da eutrofização.....</i>	24
3.3	Índice de Estado Trófico (IET).....	26
3.3.1	<i>Modelos de determinação do Índice de Estado Trófico.....</i>	26
3.3.1.1	<i>Modelo de Carlson (1977)</i>	26
3.3.1.2	<i>Modelo de Kratzer & Brezonik (1981)</i>	26
3.3.1.3	<i>Modelo de Toledo Júnior et al. (1983)</i>	27
3.3.1.4	<i>Modelo de Lamparelli (2004)</i>	27
3.3.1.5	<i>Modelo de Cunha et al. (2013)</i>	28
3.4	Determinação do nutriente limitante	30
3.4.1	<i>O modelo de Kratzer & Brezonik (1981)</i>	31
3.4.2	<i>O modelo de Carlson (1991)</i>	31
3.4.3	<i>A razão de Redfield (1958)</i>	31
3.5	Parâmetros de qualidade da água utilizados no IET.....	32
3.5.1	<i>Nitrogênio.....</i>	32
3.5.2	<i>Fósforo.....</i>	32
3.5.3	<i>Clorofila-a</i>	33
3.5.4	<i>Transparência da água</i>	33
3.6	Incertezas e risco de eutrofização.....	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1	Modelagem da eutrofização.....	35
4.2	Estudo de caso: reservatório Araras	36
4.3	Aquisição de dados	39
4.4	Análise estatística das variáveis limnológicas e hidroclimáticas	40

4.5	Determinação da metodologia de avaliação multimodelo IET.....	40
4.6	Determinação do nutriente limitante	42
4.7	Risco de eutrofização	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Avaliação das variáveis limnológicas, volume percentual e precipitação diária....	44
5.2	Correlações empíricas dos parâmetros de qualidade da água.....	48
5.3	Correlações empíricas entre o volume percentual e os parâmetros de qualidade..	53
5.4	Correlações empíricas entre o volume percentual e os IETs multimodelo.....	57
5.5	Correlações empíricas entre a precipitação diária e os IETs multimodelo.....	58
5.6	Determinação do nutriente limitante para o reservatório Araras.....	60
5.7	Classificação trófica da avaliação multimodelo IET para o reservatório Araras ..	63
5.8	Risco de eutrofização no reservatório Araras.....	69
5.9	Caracterização Trófica do Reservatório Araras pela Avaliação Multimodelo IET..	72
4	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

A eutrofização é um problema global recorrente em lagos e reservatórios, sendo intensificada em ambientes acometidos por grande variabilidade climática espaço-temporal, como é o caso dos reservatórios localizados na região semiárida do Brasil, esses reservatórios superficiais representam a fonte principal de abastecimento durante a maior parte do ano e são reservatórios mais suscetíveis aos processos de eutrofização em virtude da grande variação de nível, dos longos períodos de baixa recarga e também devido às altas taxas de evaporação a que esses corpos hídricos estão submetidos (ROCHA; LIMA NETO, 2022; GUIMARÃES, 2023).

Dentre muitos efeitos negativos, como a degradação da qualidade da água para o abastecimento humano, depleção de oxigênio dissolvido, uso recreativo limitado, a eutrofização pode promover a proliferação de cianobactérias potencialmente produtoras de toxinas que são nocivas para a saúde humana e essa proliferação excessiva demanda aumento no custo de tratamento de água e, por consequência, coloca em risco seus usos múltiplos (GELETU, 2023).

O Índice de Estado Trófico (IET) tem por finalidade principal classificar os corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes como Fósforo e Nitrogênio e seus efeitos relacionados ao crescimento excessivo das algas e cianobactérias nos ecossistemas aquáticos (CETESB, 2017).

O IET orienta a prioridade para a tomada de decisões sobre a gestão dos recursos hídricos, políticas públicas para o meio ambiente e disponibilidade de informações ao público sobre a qualidade das águas e sobre eutrofização, é de fácil aplicação devido à praticidade das determinações analíticas dos parâmetros fósforo total, clorofila-*a* e transparência da água, portanto é uma ferramenta útil para tornar os estudos relativos à eutrofização mais objetivos, sintetizando as informações sobre os parâmetros físico, químicos e biológicos, além poder facilitar a comunicação com diversos públicos usuários da água (BEM *et al.*, 2009; ANA 2017).

No entanto, os IETs que têm sido frequentemente utilizados para as avaliações de estado trófico não foram especificamente desenvolvidos para águas de reservatórios de regiões tropicais e merecem atenção na interpretação dos dados obtidos para sistemas lênticos localizados na região semiárida do nordeste brasileiro (BARROS 2013; ROLIM *et al.*, 2019).

Uma melhor compreensão da classificação trófica de reservatórios com base em estudos comparativos e ao longo de tendências temporais pode facilitar o desenvolvimento de métricas fáceis de calcular e fáceis de divulgar como também podem fortalecer muito a previsão e a gestão da eutrofização dos ecossistemas aquáticos (DODDS & COLE, 2007; KLIPPEL, 2020).

O uso de índices de estado trófico tornou-se uma ferramenta comumente usada em programas de monitoramento de qualidade da água, e há um grande debate entre pesquisadores sobre qual índice deve ser usado para sistemas aquáticos tropicais, resultando no uso de vários índices e, conseqüentemente, resultando em classificações tróficas diferentes para o mesmo ecossistema aquático (ARAÚJO *et al.*, 2018; MOLISANI *et al.*, 2010; POMARI *et al.*, 2018).

A utilização de IET para caracterizar as condições tróficas de reservatórios do semiárido tem apresentado consideráveis limitações principalmente devido ao clima semiárido determinar condições que influenciam na dinâmica do fenômeno da eutrofização notadamente em conseqüências das secas e estiagens que são recorrentes nessa região apresentando condições diferentes de demais regionais para as quais esses índices foram especialmente desenvolvidos.

Então a aplicação de uma abordagem multimodelo IET, associada ao cálculo probabilístico de risco de eutrofização é apresentado como uma metodologia consistente para a caracterização da eutrofização em reservatório inserido no clima semiárido tropical brasileiro.

A avaliação multimodelo IET consiste de uma ferramenta metodológica que permite conhecer a condição trófica do manancial, atual ou histórica, de forma simples, eficiente e barato, com grandes vantagens em relação a outros métodos, principalmente para as regiões semiáridas, onde a degradação da qualidade da água é acentuada devido às conseqüências impostas pelo clima, como estiagem e secas frequentes, intensificada por atividades antrópicas que se manifestam na forma de fontes de poluição pontuais e/ou difusas na bacia hidrográfica.

Essa técnica de avaliação gera resultados de fácil compreensão para a gestão hídrica sendo de grande relevância para a saúde pública devido à caracterização trófica poder permitir imediata tomada de decisões do planejamento hídrico, incluindo a recomendação de tratamento adequado da água para o abastecimento, uma vez que é a qualidade da água bruta que determina a adequada tecnologia de tratamento a ser adotada ou modificada, compatível com a condição trófica da água bruta, bem como outras medidas seguranças para os demais usos do manancial.

Justifica-se empregar a avaliação multimodelo IET para caracterizar a eutrofização de reservatório do semiárido Nordeste, com estudo de caso do reservatório Araras, objetivando solucionar as deficiências que podem afetar a aplicabilidade de IET em reservatório de região semiárida tropical devido às diferentes estruturas e condições de construção dos modelos desenvolvidos para outras regiões de características consideravelmente diferentes da semiárida.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste estudo é empregar a avaliação multimodelo IET integrada ao cálculo de risco de eutrofização para a caracterização do estado trófico do reservatório Araras.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para caracterização da eutrofização do reservatório Araras são:

- a) Determinar o nutriente limitante mediante os três modelos consolidados;
- b) Integrar diferentes modelos de IET para obter uma faixa trófica multimodelo;
- c) Caracterizar o estado trófico com avaliação multimodelo e risco de eutrofização;
- d) Propor uma escala de intensidade trófica para reservatório do semiárido tropical;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Gestão dos recursos hídricos

Em sentido amplo, a gestão das águas pode ser definida como o conjunto de procedimentos organizados para solucionar os problemas referentes ao uso e ao controle dos recursos hídricos. O objetivo da gestão é atender principalmente, dentro das limitações econômicas e ambientais e respeitando os princípios de justiça social, à demanda de água pela sociedade a partir de uma disponibilidade limitada. A gestão de águas é formada por três subfunções: planejamento, administração e a regulamentação (CAMPOS; STUDART, 2001).

O gerenciamento é a aplicação de medidas estruturais e não-estruturais nos sistemas hídricos, naturais e artificiais, em benefício humano e atendendo a objetivos ambientais. As ações estruturais são as que requerem a construção de estruturas, para que se obtenham controles no escoamento e na qualidade das águas, como a construção de barragens e adutoras, a construção de estações de tratamento de água etc. As ações não-estruturais são programas ou atividades que não requerem a construção de estruturas, como zoneamento de ocupação de solos, regulamentos contra desperdício de água (GRIGG, 1996; CAMPOS; STUDART, 2001).

O planejamento é constituído pelo conjunto das atividades necessárias à previsão das disponibilidades e das demandas de águas, com vistas a maximizar os benefícios econômicos e sociais. O planejamento consta das atividades: inventário dos recursos hídricos, estudo da qualidade das águas, estimativa das demandas, estudos prospectivos do balanço oferta x demanda, e da avaliação e do controle do próprio planejamento (CAMPOS; STUDART, 2001).

A Lei dos Recursos Hídricos ou Lei Federal das Águas, Nº 9.433-1997, que ao instituir a Política Nacional dos Recursos Hídricos, reconhece a água como um bem público com valor econômico, e tendo o Comitê de Bacia como um instrumento para compatibilizar e também adequar seus usos, e promover a descentralização de sua gestão, considerando a realidade local e assim envolvendo maior número de atores e organizações sociais (JUNQUEIRA *et al.*, 2010).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) por meio da Resolução CONAMA, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005), estabeleceu condições de qualidade para o enquadramento dos corpos hídricos em território nacional, de acordo com os seus usos preponderantes, e para o lançamento de efluentes. Essa resolução, como instrumento jurídico, fixou limites superiores ou inferiores para diversas variáveis em sistemas de água doce, salobra e salina. Desde o início de sua vigência, o documento tem sido analisado tecnicamente pela comunidade científica e se tornou referência inclusive para as pesquisas acadêmicas. Tais

pesquisas comumente promovem uma comparação entre os resultados obtidos no ambiente aquático com seus respectivos limites associados ao seu enquadramento (CUNHA *et al.*, 2013).

Em 2010 é editada a nova lei sobre a política de recursos hídricos do Ceará, a Lei nº 14.844. Esta Lei propugna que a gestão dos recursos hídricos no Ceará deva ocorrer de forma integrada, descentralizada e participativa. Uma nova relação se configura entre o Estado e a Sociedade Civil na construção de um processo de gestão participativa. Adotando a bacia hidrográfica a unidade básica de planejamentos dos recursos hídricos (SOUZA FILHO, 2018).

A bacia hidrográfica, segundo a Lei Federal Nº 9.433/1997, é a unidade territorial adotada para os fins de planejamento da gestão dos recursos hídricos do Brasil e ela é considerada no âmbito do planejamento territorial como a unidade básica de análise para o desenvolvimento das ações e das medidas estruturais e não estruturais com a perspectiva de uma integração entre a gestão dos recursos hídricos e a gestão ambiental (CARVALHO, 2020).

O estado do Ceará tem como seu órgão oficial de gestão das águas a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos que é responsável pelo gerenciamento e disciplinamento dos recursos hídricos, de forma descentralizada, de forma integrada e forma participativa. A mesma foi criada pela Lei nº 12.217 - 1993 com a finalidade de implantar um sistema de gerenciamento da oferta de água superficial e subterrânea compreendendo os aspectos de monitoramentos dos reservatórios e dos poços, abrangendo as 12 Bacias Hidrográficas do Ceará (COGERH, 2020).

Um efetivo gerenciamento dos recursos hídricos deve ser feito buscando o uso racional e sustentado de cada corpo d'água, e exige que não sejam dissociados os aspectos quantitativos dos qualitativos, já que nas condições do semiárido, no aspecto quantitativo, necessita-se conviver com a escassez hídrica, enquanto que no aspecto qualitativo, necessita-se conviver com a eutrofização, a qual é recorrente nos reservatórios do semiárido (PAULINO *et al.*, 2013).

A gestão da água é realizada também por meio de um programa de monitoramento, regular e sistemático, para o controle e avaliação da qualidade da água. Por este instrumento é possível conhecer as tendências qualitativas e quantitativas do recurso hídrico e as influências das atividades antrópicas e naturais na dinâmica do ecossistema aquático (LOPES *et al.*, 2021).

Uma gestão eficiente dos recursos hídricos é essencial para a prática de um modelo de desenvolvimento sustentável, tanto no aspecto ambiental quanto nas questões relacionadas à saúde pública, assim como para promover o desenvolvimento econômico e social de uma região, então se considera que o monitoramento regular da qualidade das águas é de suma importância para o adequado e efetivo gerenciamento dos corpos hídricos (OLIVEIRA, 2017).

Pelas condições cearenses, aspectos climáticos, econômicos e sociais, devem ser considerados no monitoramento dos reservatórios, então se considera como as principais fontes

de nutrientes a) as descargas de esgotos domésticos; b) a afluência de partículas de solos contendo nutrientes; c) presença de gado, principalmente no entorno do reservatório; d) exploração de piscicultura intensiva no espelho d'água. Nas condições do semiárido a eutrofização se intensifica pela baixa taxa de renovação da massa d'água armazenada nos reservatórios variando a cada ano pela intensidade do período chuvoso (PAULINO *et al.*, 2013).

Para determinar o estado trófico e avaliar os resultados, a COGERH considera os seguintes aspectos: IET de Carlson, adaptado por Toledo; nutriente limitante; contagem de cianobactérias; intensidade de plantas aquáticas presentes no espelho d'água; volume armazenado no açude; e observações das gerências regionais na bacia (PAULINO *et al.*, 2013).

A frequência de realização das coletas e a quantidade de pontos monitorados dentro de cada corpo hídrico pela COGERH variam conforme o porte e importância estratégica de cada açude, podendo ser mensal, trimestral semestral, com número de pontos variando entre 1 a 13, com 0,3m de profundidade. As análises podem ser realizadas *in loco* com aparelhos portáteis ou as amostras coletadas são encaminhadas a laboratórios responsáveis (GUIMARÃES, 2023).

O escoamento superficial e os usos e ocupação do solo são as principais fontes de exportação de fósforo e nitrogênio para os recursos hídricos. A substituição de florestas por áreas agrícolas e áreas urbanas aumentam a concentração de nutrientes nas bacias hidrográficas. Esse aumento está relacionado com o solo descoberto que pode ser influenciado pela densidade do gado nas áreas adjacentes, então a agricultura, urbanização e mineração são as principais fontes da deterioração ou degradação da qualidade das águas (ROCHA & LIMA NETO, 2021).

Em toda a área de influência do reservatório Araras observava-se criações de gado configurando-se como o principal impacto identificado no reservatório. A presença desses animais acarreta sérios prejuízos à qualidade da água, na medida que seus excrementos são facilmente lixiviados, causando o aumento de nutrientes e resíduos no açude (COGERH, 2018).

As áreas de pastoreio estão diretamente ligadas ao extrativismo vegetal de lenha visto que é realizado o desmatamento do terreno, são responsáveis por grande parte da degradação da vegetação nativa, devastando inclusive áreas de APP do reservatório. Essas áreas desmatadas são mais suscetíveis aos processos erosivos, acelerando assim o assoreamento e favorecendo ainda mais carreamento de nutrientes para a bacia hidráulica do reservatório (COGERH, 2018).

A criação de peixes na área de influência do reservatório Araras contatava uma piscicultura, que está desativada desde 2010 devido à situação de escassez hídrica na região. A piscicultura em questão localiza-se às margens do reservatório e de acordo com informações obtidas de um funcionário desse empreendimento, a produção era de 240 gaiolas de dimensão 3 x 3m, e que cada gaiola tinha capacidade de produzir de 1.000 a 1.200kg (COGERH, 2018).

Com as secas plurianuais e diminuição drástica do volume do reservatório, principalmente no período do ano de 2012 ao ano de 2017, como é sabido, houve considerável diminuição da produção da piscicultura, mas a partir desse período de secas mais intensas retomaram a produção e atualmente o reservatório conta com as diversas gaiolas de piscicultura.

Identificou-se também a existência de comunidades na APP do reservatório. A ocupação nessas áreas causa uma maior pressão nos recursos naturais, principalmente devido a retirada da vegetação nativa e ao despejo de esgotos e resíduos por parte da população. Além disso, parte da população ribeirinha utiliza a pesca como atividade de subsistência, realizando despejos de restos de peixes acrescentando o porte de nutrientes ao reservatório (COGERH, 2018).

O comitê de bacia hidrográfica é o órgão colegiado instituído para atuar nessa unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos direcionando debates sobre a questão dos recursos hídricos na bacia, por possuir poder consultivo e deliberativo é a instância mais importante de participação e integração de planejamento e ações na área dos recursos hídricos, composto por órgãos e entidades estaduais e municipais na escala regional (MOREIRA, 2014).

A alocação de água de forma participativa é uma questão que ultrapassa o aspecto técnico da gestão; envolve a negociação de interesses políticos, sociais e econômicos, em que participam os diversos atores sociais com realidades e interesses diferentes (SILVA *et al.*, 2006).

A alocação de água que é um dos instrumentos de gestão que assume especial relevância em regiões que historicamente enfrentam os desafios da escassez hídrica relativa e dos conflitos que lhe são associados, tendo em vista os múltiplos usos da água e interesses vinculados a mesma, então nesse contexto, o estado do Ceará despontou por seu pioneirismo na alocação, ao poder introduzir a participação pública no processo de tomadas de decisão (SILVA *et al.*, 2013).

O processo de gestão negociada da água que é promovido anualmente pela COGERH é realizado após a quadra chuvosa, a partir da qual tem a definição da disponibilidade hídrica de cada reservatório e da recarga de água ocorrida durante a quadra chuvosa (MOREIRA, 2014).

Uma política articulada entre os setores, municipal, estadual e nacional é necessário considerando que a bacia hidrográfica é a unidade territorial básica para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, para isso existe o Comitê de Bacia Hidrográfica que tem como escopo a gestão dos recursos hídricos nessa unidade, cujo caráter do Comitê de Bacia é normativo, deliberativo e consultivo, e tem poder de tomada de decisão em situações onde há muitos interesses de cunho individual e coletivo (SANTOS *et al.*, 2015; PEREIRA *et al.*, 2020).

No estado do Ceará, os Comitês de Bacias são compostos por representantes de instituições governamentais e não-governamentais, distribuídos em 04 (quatro) setores, sendo

a seguinte a distribuição e percentual de participação: Usuários (30%); Sociedade Civil (30%); Poder Público Municipal (20%) e pelo Poder Público Estadual/Federal (20%) (CEARÁ, 2006).

No Ceará os Comitês de Bacia são instâncias fundamentais para a administração de conflitos cabendo a COGERH o relevante papel de informar e mediar os conflitos associados com apropriação da água no processo de Alocação Negociada de Água (SOUZA FILHO, 2018).

3.2 Qualidade da água e os reservatórios artificiais em condições semiáridas

Os reservatórios são lagos construídos pelo homem principalmente por meio do barramento de um rio, considerando que os reservatórios de grande porte são geralmente sistemas compartimentados e com elevada complexidade espacial como altimetria, área, volume etc, e temporal como o tempo de residência (FANG *et al.*, 2011; FRANÇA *et al.*, 2022).

Esses reservatórios assumem relevância fundamental, principalmente nos períodos mais críticos de secas, sendo a alternativa mais viável para assegurar o abastecimento de água. A construção de reservatórios na região semiárida Nordeste do Brasil é comum em razão da pouca disponibilidade de água e é a principal solução adotada para garantir a água para os diversos usos considerando os períodos de estiagem, minimizando os problemas advindos da escassez de água (NASCIMENTO *et al.*, 2016; AMMAR *et al.*, 2017; WIEGAND *et al.*, 2021).

Os fertilizantes usados de forma indiscriminada, despejos de efluentes domésticos e industriais nos corpos hídricos, índices elevados de evaporação da região semiárida influenciam o acúmulo de fósforo e nitrogênio nas águas, alterando as características de qualidade dessas águas, destinadas prioritariamente ao abastecimento humano, podendo acarretar como principal problema a eutrofização, portanto a qualidade da água nos reservatórios do semiárido Nordeste brasileiro frequentemente não atende às exigências normativas de qualidade quanto a seus usos múltiplos (CARPENTER, 2008; CHELLAPA *et al.*, 2009, BEZERRA *et al.*, 2014).

3.2.1 Eutrofização

Eutrofização é o enriquecimento das águas superficiais com nutrientes vegetais, normalmente associado a fontes antropogênicas de nutrientes, por sua vez o estado trófico dos lagos e reservatórios é o conceito central de sua gestão, portanto descreve a relação entre o estado nutricional e o aumento da matéria orgânica dos lagos e reservatórios (MISHA, 2023).

Eutrofização é um processo natural de aporte de nutrientes ao corpo d'água, entendido como o envelhecimento natural, mas quando esse aporte é induzido por ações antrópicas,

denominada de eutrofização artificial, acelera o processo e pode alterar seriamente a dinâmica dos reservatórios afetando seus usos múltiplos (NOGUEIRA, 1991; VON SPERLING, 2005).

A eutrofização pode ainda ser caracterizada como o aumento da concentração de nutrientes, especialmente o nitrogênio e o fósforo, nos ecossistemas aquáticos que tem por consequência o aumento de suas produtividades fitoplanctônicas e podem levar a alteração de suas características: no sabor, odor, turbidez, redução de oxigênio dissolvido e a contaminação da água (ESTEVES, 1998; LAMPARELLI, 2004; TUNDISI, 2008; SARDINHA *et al.*, 2018).

Os prejuízos mais acentuados da eutrofização consistem em romper o equilíbrio, causar danos e provocar a degradação das funções dos ecossistemas aquáticos resultando numa cadeia de consequências negativas ao meio aquático e à sociedade, que em estágio mais avançado de degradação impacta a qualidade da água para o consumo humano tanto pelos aspectos econômicos e financeiros relacionados aos tratamentos avançados quanto pela possibilidade de prejuízos à saúde, principalmente por causa das cianotoxinas responsáveis pelas intoxicações agudas, crônicas ou letais de seres humanos e animais (YANG *et al.*, 2008).

A eutrofização artificial é considerada como uma reação em cadeia de causas e efeitos bem evidentes, que a característica principal é a quebra de estabilidade do ecossistema. A estabilidade em ecossistemas aquáticos caracteriza-se pelo equilíbrio existente entre produção de matéria orgânica e o seu consumo e decomposição. Com o rompimento do estado de equilíbrio por causa da eutrofização o ecossistema passa a produzir mais matéria orgânica do que é capaz de consumir e decompor o que acarreta o desequilíbrio aquático (ESTEVES, 2011).

A eutrofização pode ser drástica para o ambiente, impede a utilização múltipla dos sistemas aquáticos, altera diretamente o componente biótico dos recursos hídricos, aumenta de modo acentuado a biomassa de algas, florações de cianobactérias e macrófitas aquáticas e afeta o componente socioeconômico. Resultados indiretos desse processo podem ser ainda citados: alterações na estrutura das comunidades aquáticas, redução das concentrações de oxigênio dissolvido, a formação de gás sulfídrico e mortandades de peixes etc (JÚLIO-JÚNIOR, 2005).

3.2.2 Nutriente limitante

Nutriente limitante (nitrogênio e fósforo) é aquele essencial ao crescimento de uma determinada população, de maneira que, caso sua concentração seja diminuta, também será diminuta a taxa de crescimento dessa população em determinado corpo hídrico, ao passo que, caso a concentração desse nutriente sofra um aumento, também sofrerá um aumento a taxa de crescimento da referida população, no sistema aquático (TONÉ, 2016; ARAÚJO *et al.*, 2020).

O nutriente limitante demonstra que há equivalência entre a demanda nutricional da alga e a distribuição de nutrientes na sua biomassa. Pela relação de Redfield ($C_{106}H_{18}O_{45}N_{16}P_1$) essa biomassa algal tem sua constituição conhecida, então em média as algas demandam 16 vezes mais nitrogênio do que fósforo, então se a relação N:P (base molar) for consideravelmente superior a 16, então o fósforo será o nutriente limitante, mas se a relação N:P for consideravelmente inferior a 16, então o nitrogênio será o limitante (VON SPERLING, 2000).

As concentrações totais desses dois nutrientes devem ser divididas pelas suas respectivas massas atômicas (14 e 31), sendo depois realizada o cálculo da razão de N:P para se obter o nutriente limitante. Caso o resultado seja superior a 16, então P poderá ser o nutriente limitante, caso contrário, o N é que será considerado nutriente limitante (ARAÚJO *et al.*, 2018).

O nitrogênio e o fósforo são nutrientes de grande importância à cadeia alimentar, porém a partir de fontes artificiais, quando descarregados em altas concentrações nas águas superficiais e associados a condições favoráveis de luminosidade podem provocar o problema da eutrofização. Consideram-se como principais fontes de liberação de fósforo os esgotos domésticos e industriais. Águas drenadas em áreas agrícolas e urbanas também podem provocar a presença em excesso do Fósforo nas águas naturais (CETESB, 2009; BARRETO *et al.*, 2013).

3.2.3 Condições climáticas e antrópicas no processo da eutrofização

As características climáticas do Nordeste brasileiro como sazonalidade da precipitação e alta variabilidade das chuvas determinam o comportamento fluvial, pois a distribuição da chuva no tempo e no espaço associada às formações geológicas cristalinas são fatores condicionantes da disponibilidade dos recursos hídricos superficiais; e a bacia hidrográfica (delimitação geográfica e hidrológica contornada por divisores topográficos) ao encaminhar as águas, sedimentos e materiais dissolvidos influenciam direta ou diretamente na qualidade das águas dos reservatórios, podendo acarretar mudanças (SILVA *et al.*, 2006; ZANELLA, 2014).

Os efeitos da variabilidade da precipitação sobre a qualidade da água podem ser devido à combinação de dois mecanismos: o aumento da concentração de nutrientes no período de seca principalmente devido à redução no volume percentual das águas dos reservatórios e também ao aumento da quantidade de material alóctone carregados para o corpo aquático durante os períodos das intensas chuvas esporádicas anuais (SANTOS *et al.*, 2017; NOBRE *et al.*, 2020).

Na região semiárida Nordestina brasileira, os reservatórios possuem usos múltiplos, tais como fornecimento de água para abastecimento, irrigação e dessedentação de animais.

Porém, muitos reservatórios sofrem impactos negativos na qualidade da água causados por atividades humanas e devido às próprias condições naturais da região (BARBOSA *et al.*, 2012).

As fontes de poluição não-pontuais, como agricultura e pecuária, são determinantes para os sistemas aquáticos da região semiárida, pois frequentemente são as principais fontes externas de nutrientes que chegam aos reservatórios durante a estação chuvosa através da lixiviação do solo, porque em regiões semiáridas, a poluição difusa se intensifica por causa das condições peculiares da região, principalmente em razão dos solos raros que predominam e com pouca cobertura por conta da vegetação característica da Caatinga (OYAMA & NOBRE, 2004).

Nos períodos secos a recarga externa de nutrientes é muito baixa nos reservatórios do semiárido, mas as concentrações de nutrientes, principalmente fósforo, permanecem altas devido ao aumento do tempo de retenção da água nos reservatórios que concentram os nutrientes no sistema. Também os períodos secos tornam os reservatórios mais suscetíveis aos fatores como altas temperaturas e profundidades muito baixas que podem influenciar a liberação de muito fósforo do sedimento (BRAGA *et al.*, 2019; CAVALCANTE *et al.*, 2018b).

Os reservatórios construídos na região Nordeste são ambientes relativamente rasos e de grandes espelhos d'água, altamente vulneráveis à ação dinâmica do vento e às oscilações climáticas. Esses ambientes tendem a receber uma elevada carga de nutrientes e sedimentos em suspensão, uma vez que desde sua área de drenagem escoam as águas das chuvas concentradas em poucos meses do ano, o que favorece determinados processos erosivos do solo e os torna ecossistemas consideravelmente vulneráveis para o fenômeno da eutrofização (ROLIM, 2016).

Altas taxas de evaporação, baixas precipitações pluviométricas com consequente redução de volume dos reservatórios e ocorrência esporádica de chuvas torrenciais concentradas em curto espaço de tempo, são eventos climatológicos importantes e característicos de regiões semiáridas que podem provocar mudanças em seus corpos hídricos. Essas regiões podem apresentar um intenso uso do solo para o desenvolvimento de atividades como agricultura, pecuária e ocupação humana. Essas atividades podem expor os reservatórios a processos físicos, químicos e biológicos, mudar a dinâmica desses mananciais e provocar alterações substanciais na qualidade da água (ABBASPOUR *et al.*, 2012; NOBRE *et al.*, 2020).

Os reservatórios são vulneráveis à degradação da qualidade de suas águas, em função não apenas da variabilidade climática, mas também de fatores antrópicos. Essas estruturas lânticas têm elevado tempo de detenção hidráulica, pois sua principal função é a reserva hídrica plurianual, isso é fator que contribui ainda mais para essa vulnerabilidade. O elevado tempo de detenção hidráulica em reservatórios do semiárido intensifica processos físicos, químicos e biológicos causando desequilíbrio nesses sistemas (MOSLEY, 2015; WIEGAND *et al.*, 2016).

A dinâmica do fósforo nos reservatórios é influenciada também pela ressuspensão desse nutriente armazenado no sedimento, tal fenômeno acontece em razão principalmente de mudanças químicas e/ou físicas na água que provoca dessorção do fósforo o que torna a recarga interna num fenômeno importante do processo da eutrofização (PRADA & OLIVEIRA, 2006).

3.3 Índice de Estado Trófico (IET)

O IET é uma ferramenta de cálculo que utiliza as variáveis dos parâmetros clorofila-*a*, fósforo total, nitrogênio total e medidas da profundidade atingida na coluna d'água pelo Disco de *Secchi* para determinar a evolução da qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e os seus efeitos relacionados a crescimento excessivo de algas (LOPES *et al.*, 2021).

O IET tem por uma de suas finalidades a classificação dos corpos de água em diferentes graus de trofia e avalia a qualidade da água de acordo com o aumento de nutriente e seu efeito relacionado a crescimento excessivo de algas ou infestação de macrófitas aquáticas. Os resultados calculados com os valores dos nutrientes são a medida do potencial de eutrofização, o nutriente o agente causador do processo, e a clorofila-*a* é a resposta do corpo hídrico ao agente causador, portanto o IET engloba a causa e o efeito do processo da eutrofização (ANA, 2022).

3.3.1 Modelos de determinação do Índice de Estado Trófico

Os principais modelos de determinação do IET comumente utilizados em regiões brasileiras são o modelo Carlson (1977); o modelo de Kratzer & Brezonik (1981); o modelo Toledo Júnior *et al.* (1983); o modelo de Lamparelli (2004); e o modelo de Cunha *et al.* (2013).

3.3.1.1 Modelo de Carlson (1977)

O modelo de determinação do IET desenvolvido por Carlson (1977) para ambientes temperados leva em consideração o cálculo do fósforo total, da clorofila-*a* e da transparência da água medida pelo disco de *Secchi*, e o cálculo da média desses três parâmetros consiste no IET médio, com esse cálculo é possível realizar a classificação do grau trófico do reservatório.

3.3.1.2 Modelo de Kratzer & Brezonik (1981)

O IET com base no nitrogênio total desenvolvido por Kratzer & Brezonic (1981), considera a concentração crítica de clorofila-*a* de 10µg/L como sendo a concentração verificada no início das condições tróficas em corpo hídrico, para isso utilizaram a relação do nitrogênio total com clorofila-*a*, calculado pela equação do NT, o estudo foi realizado em lagos da Flórida.

Como Kratzer & Brezonic (1981) apenas acrescentaram a equação do NT ao modelo de Carlson (1977), que é utilizada quando o Nitrogênio for considerado o nutriente limitante, portanto para cálculo de demais variáveis continuam as equações propostas por Carlson (1977).

3.3.1.3 Modelo de Toledo Júnior et al. (1983)

Toledo Júnior et al., (1983) modificaram matematicamente o modelo de Carlson (1977) para se adequar a ambientes subtropicais, aplicando a análise de regressão linear aos valores das concentrações de fósforo total, clorofila-*a* e transparência do disco de Secchi em uma pesquisa realizada no reservatório de Barra Bonita-SP (MOURA FILHO; ARAÚJO, 2020)

O método de Toledo Júnior et al. (1983) é uma adaptação do Índice de Carlson (1977) para clima tropical e se baseia na avaliação do IET por meio das mesmas variáveis analisadas por Carlson (1977). Os autores modificaram o clássico IET de Carlson (1977) alterando suas expressões originais para adequá-las aos ambientes de clima subtropicais, esse índice é composto pelos índices: IET (DS); IET (PT); IET (Chl-*a*), transparência, fósforo e clorofila-*a*.

Os resultados calculados a partir dos valores da aplicação do IET, o qual foi alterado por Toledo Júnior et al. (1983), devem ser interpretados de acordo com os seguintes critérios: Se o $IET < 44$ (Oligotrófico); se o $44 < IET \leq 54$ (Mesotrófico) e se o $54 < IET \leq 74$ (Eutrófico).

Toledo Júnior (1990) alterou novamente o IET adaptado inserindo mais categorias de trofia. Este aperfeiçoamento foi necessário porque os corpos aquáticos são sistemas complexos e são não estáticos e algumas considerações passam a não corresponder à realidade do ambiente.

3.3.1.4 Modelo de Lamparelli (2004)

Lamparelli (2004), utilizando dados de 34 pontos em reservatórios da Rede de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais da CETESB do Estado de São Paulo e considerando o IET de Toledo Júnior et al., (1983), fez modificações para obter um IET baseado no PT e Chl-*a*. A classificação baseada nos valores do IET é feita a partir da média aritmética.

Estudos de estado de trofia realizados para reservatórios localizados em regiões de clima tropical ou subtropical normalmente não consideram o índice DS na estimativa de Estado

Trófico devido à elevada turbidez decorrente de material em suspensão nesses corpos d'água, o IET representa a média aritmética simples apenas do PT e do Chl-*a* (LAMPARELLI, 2004).

3.3.1.5 Modelo de Cunha et al. (2013)

Cunha (2012) propôs um índice para avaliação do estado trófico em reservatórios subtropicais com dados bimestrais de reservatórios de São Paulo de 1996 a 2009. Cunha, Calijuri e Lamparelli (2013) adicionaram a classe hipereutrófico aos níveis de trofia de Cunha (2012), aumentando assim a amplitude de classificação de estado trófico (ARAÚJO *et al.*, 2018).

Cunha *et al.* (2013), consideraram dados secundários de 18 reservatórios monitorados durante 14 anos pela CETESB, justificando o ajuste devido aqueles índices desenvolvidos para ambientes temperados poderem superestimar os resultados então propuseram um IET considerando as concentrações das variáveis Chl-*a* e PT no cálculo do índice, aplicando-o ao reservatório de Itupararanga, em SP, o qual se mostrou eficiente para o estudo de estado trófico.

Na Tabela 1 são mostrados os critérios das classificações dos IETs dos cinco modelos.

Tabela 1 – Critérios das classificações adotadas pelos cinco IETs de composição da avaliação

Classificação do Estado trófico	Critério	Autores
Oligotrófico	$IET \leq 40$	Carlson (1977)
Mesotrófico	$40 < IET \leq 50$	
Eutrófico	$50 < IET \leq 60$	
Hipereutrófico	$IET \geq 60$	
Oligotrófico	$IET \leq 40$	Kratzer & Brezonic (1981)
Mesotrófico	$40 < IET \leq 50$	
Eutrófico	$50 < IET \leq 60$	
Hipereutrófico	$IET \geq 60$	
Ultraoligotrófico	$IET \leq 24$	Toledo Júnior <i>et al.</i> (1990)
Oligotrófico	$24 < IET \leq 44$	
Mesotrófico	$44 < IET \leq 54$	
Eutrófico	$54 < IET \leq 74$	
Hipereutrófico	$IET > 74$	
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$	Lamparelli (2004)
Oligotrófico	$47 < IET < 52$	
Mesotrófico	$52 < IET < 59$	
Eutrófico	$59 < IET < 63$	
Supereutrófico	$63 < IET < 67$	
Hipereutrófico	$IET \geq 67$	
Ultraoligotrófico	$IET \leq 51,1$	Cunha <i>et al.</i> (2013)
Oligotrófico	$51,2 < IET \leq 53,1$	
Mesotrófico	$53,2 < IET \leq 55,7$	
Eutrófico	$55,8 < IET \leq 58,1$	
Supereutrófico	$58,2 < IET \leq 59,0$	
Hipereutrófico	$IET \geq 59,1$	

Fonte: Klippel *et al.* (2020)

Na Tabela 2 são apresentados o equacionamento dos modelos de determinação dos IETs utilizados neste estudo para realização da avaliação multimodelo de proposta de caracterização.

Tabela 2 – Equacionamento dos modelos de determinação dos IETs de composição da avaliação

Autores	Modelos de IET	
Carlson (1977)	$IET(DS) = 10 \left(6 - \frac{\ln(DS)}{\ln(2)} \right)$	(01)
	$IET(Chl-a) = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(2,04 - 0,68\ln(Chl-a))}{\ln(2)} \right] \right\}$	(02)
	$IET(PT) = 10 \left(6 - \frac{\ln(\frac{48}{PT})}{\ln(2)} \right)$	(03)
Kratzer & Brezonik (1981)	$IET(NT) = 10 \left[6 - \left(\frac{\ln(\frac{1,47}{NT})}{\ln(2)} \right) \right]$	(04)
	$IET(DS) = 10 \left(6 - \frac{\ln(DS)}{\ln(2)} \right)$	(05)
	$IET(Chl-a) = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(2,04 - 0,68\ln(Chl-a))}{\ln(2)} \right] \right\}$	(06)
Toledo Júnior <i>et al.</i> (1984)	$IET(DS) = 10 \left[6 - \left(\frac{0,64 + \ln(DS)}{\ln(2)} \right) \right]$	(07)
	$IET(PT) = 10 \left[6 - \left(\frac{\ln(\frac{80,62}{PT})}{\ln(2)} \right) \right]$	(08)
	$IET(Chl-a) = 10 \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,695\ln(Chl-a)}{\ln(2)} \right) \right]$	(09)
Lamparelli (2004)	$IET(PT) = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(-0,42\ln(PT) + 1,77)}{\ln(2)} \right] \right\}$	(10)
	$IET(Chl-a) = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(-0,34\ln(Chl-a) + 0,92)}{\ln(2)} \right] \right\}$	(11)
Cunha <i>et al</i> (2013)	$IET(PT) = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(-0,28\ln(PT) + 1,33)}{\ln(2)} \right] \right\}$	(12)
	$IET(Chl-a) = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(-0,25\ln(Chl-a) + 0,84)}{\ln(2)} \right] \right\}$	(13)

Fonte: Adaptado de Klippel *et al.* (2020).

Em que:

PT = concentração do fósforo total ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

Chl-*a* = concentração da clorofila-*a* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

DS = transparência da água pelo DS (metros);

NT = concentração de nitrogênio total (mg/L);

ln = logaritmo neperiano (valor adimensional).

Na Tabela 3 são apresentas as descrições das principais característica dos corpos hídricos referentes à qualidade das águas em razão do estado trófico e com suas respectivas nomenclaturas de classificação trófica identificadas conforme as observações e suas contações.

Tabela 3 – Classes de estado trófico e respectivas características encontradas no corpo d'água.

Classe Trófica	Características dos corpos de água
Ultraoligotrófico	Corpo hídrico limpo, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam em prejuízos aos usos da água.
Oligotrófico	Corpo hídrico com águas limpas, de baixa produtividade, não ocorrem interferências indesejáveis nos usos da água em razão da presença de nutrientes.
Mesotrófico	Corpo hídrico com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas na maioria dos casos em níveis aceitáveis
Eutrófico	Corpos de água com alta produtividade e redução da transparência, afetados por atividades antrópicas, ocorrendo alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos.
Supereutrófico	Corpo hídrico com alta produtividade, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, com frequentes alterações indesejáveis na qualidade da água, como florações de algas e interferências nos seus múltiplos usos.
Hipereutrófico	Corpos de água afetados pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Fonte: Lamparelli (2004); Cetesb (2009); ANA (2017); COGERH (2022).

3.4 Determinação do nutriente limitante

As importantes metodologias de determinação do fator limitante utilizadas são os modelos de Kratzer & Brezonik (1981), de Carlson (1991) e a razão de Redfield (1958). A seguir são apresentados esses modelos de determinação do nutriente limitante e suas condições.

A razão de Redfield estabeleceu o conceito de que as algas, em boas condições de crescimento, terão composição elementar com proporções atômicas relativamente definidas. No caso, para N e P, essa relação é de 16:1. Assim sendo, se a proporção NT/PT é maior ou

igual a 16:1, PT é o mais provável fator limitante para o crescimento de algas. Senão, o NT é o nutriente limitante da produção fitoplanctônica (REDFIELD, 1958; WIEGAND *et al.*, 2020).

Carlson (1991) mostrou que diferenças entre os IETs, isto é, [IET (Chl *a*) – IET (PT)] e [IET (Chl *a*) – IET (SD)], podem ser utilizadas para inferir os fatores limitantes para a produtividade primária de um lago. A limitação por fósforo ocorre quando $IET(Chl\ a) \geq IET(PT)$. Entretanto, quando $IET(Chl\ a) < IET(PT)$, a limitação pode ocorrer por outro fator (por exemplo, luz, herbivoria ou turbidez não algal). Similarmente, as diferenças entre [IET (Chl *a*) – IET (NT)] podem ser usadas para inferir se ocorre limitação por NT (WIEGAND *et al.*, 2020).

Kratzer e Brezonik (1981) demonstraram empiricamente que para [IET (NT) – IET (PT) > 0] os lagos apresentavam limitação por fósforo. Quando [IET (NT) – IET (PT) < 0], nitrogênio é o nutriente limitante. E quando o resultado da diferença for próximo do valor zero, então uma colimitação deve estar dominando o crescimento das algas (WIEGAND *et al.*, 2020).

A razão de Redfield foi utilizada como indicador para investigar a dinâmica da limitação de nutrientes em cada faixa de estado trófico, porque a mesma tem sido comumente empregada para realizar a determinação de nutriente limitante de corpos hídricos (WIEGAND *et al.*, 2020).

3.4.1 O modelo de Kratzer & Brezonik (1981)

$IET(NT) - IET(PT) < 0$ – Limitação pelo nutriente nitrogênio

$IET(NT) - IET(PT) \approx 0$ – Colimitação (nitrogênio e fósforo)

$IET(NT) - IET(PT) > 0$ – Limitação pelo nutriente fósforo

3.4.2 O modelo de Carlson (1991)

$IET(Chl-a) \geq IET(PT)$ – Limitação por fósforo

$IET(Chl-a) < IET(PT)$ – Limitação por outro fator

$IET(Chl-a) \geq IET(NT)$ – Limitação por nitrogênio

$IET(Chl-a) < IET(NT)$ – Limitação por outro fator

3.4.3 A razão de Redfield (1958)

$NT/PT > 16$ – Limitação por nitrogênio

$NT/PT < 16$ – Limitação por fósforo

3.5 Parâmetros de qualidade da água utilizados no IET

A eutrofização é geralmente resultante da interdependência de quatro variáveis de natureza química, física e biológica que convergem no sistema aquático em causas e efeitos modificando a dinâmica trófica do ecossistema. Esses parâmetros são variáveis limnológicas que servem para compor os IETs e utilizadas para o monitoramento da qualidade da água em reservatórios. A seguir são apresentadas essas variáveis limnológicas que constituem esses IET.

3.5.1 Nitrogênio

O nutriente nitrogênio está presente nos ambientes aquáticos principalmente nestas formas: de nitrato, de nitrito, de amônia e do íon amônio. Considerando-se que o nitrato e o íon amônio são as principais fontes de nitrogênio para os produtores primários nos ecossistemas aquáticos e a soma das concentrações dessas formas representa o nitrogênio total (ANA, 2022).

O nitrogênio é um dos elementos importantes no metabolismo dos ecossistemas aquáticos. Essa constatação se deve principalmente ao fato de desse elemento ser um dos participantes da formação de proteínas, que são um dos componentes básicos da biomassa. A presença desse elemento em baixas concentrações pode se tornar um fator de limitação importante na produção primária fitoplanctônica em ecossistemas aquáticos (ESTEVES, 2011).

3.5.2 Fósforo

A importância do elemento fósforo nos sistemas biológicos é notória, devido a sua participação em processos fundamentais do metabolismo dos seres vivos, como armazenamento de energia e estruturação da membrana celular. Na maioria dos ecossistemas aquáticos o fósforo pode ser fator limitante da produtividade, por isso é apontado como principal fator responsável pela eutrofização artificial dos ambientes aquáticos, o nutriente fósforo pode ser encontrado na água na forma de fosfato particulado, fosfato orgânico dissolvido e fosfato total (ANA, 2022).

O fósforo é um dos nutrientes vitais para o crescimento de algas e é um componente essencial na conversão da luz solar em formas de energia utilizáveis. Quantidades elevadas de fósforo podem causar crescimento excessivo de algas e levar a problemas de eutrofização. O fósforo é o limitante em muitos corpos d'água, ou seja, o nutriente com menor concentração em relação à razão estequiométrica necessária para o crescimento de plantas aquáticas. O nutriente fósforo pode influenciar muito o crescimento de algas (JI, 2017; FREIRE *et al.*, 2020).

O fósforo está presente na forma dissolvida e particulada, sendo as formas minerais ortofosfatos absorvidas com maior frequência e intensidade pelo fitoplâncton. Entre os fatores que interferem na disponibilização do fósforo, destacam-se: PH, densidade dos organismos aquáticos, clima, concentração de compostos orgânicos, sais minerais e outros (LOPES, 2019).

3.5.3 Clorofila-a

Clorofila refere-se a pigmentos produzidos nas folhas de vegetais e tecidos microbianos fotossintéticos, funcionam como fotorreceptores da luz para o processo de fotossíntese, sendo que a clorofila-a expressa a biomassa fitoplanctônica em reservatórios e está diretamente associada à quantidade de algas presentes nos ambientes aquáticos, portanto a quantidade de clorofila-a é correspondente à resposta da biomassa, que é o somatório da massa orgânica viva existente num espaço e tempo determinados, por isso a clorofila-a vem sendo utilizada como um dos principais indicador do estado trófico de sistema aquático (ANA, 2022).

A clorofila-a é utilizada como principal variável indicadora do estado trófico dos ambientes aquáticos por representar de 1 a 2% do peso seco do material orgânico em todas as algas planctônicas, indicando a presença da biomassa algal existente no corpo hídrico em um dado espaço de tempo, apesar de ser uma medida indireta, sua determinação é geralmente suficiente para caracterizar o estado de trofia no corpo de água, além de ser rápida, simples e de grande reprodutibilidade, assim estudo de fitoplâncton e biomassa associados a parâmetros físicos e químicos detectam alterações na qualidade da água (TOMAZ, 2008; BARROS, 2013).

3.5.4 Transparência da água

A transparência da coluna d'água de um corpo hídrico é um dos parâmetros a ser observado por sua relevância como indicador do estado trófico e refere-se à capacidade de atenuação da luz subaquática onde a extensão ou profundidade da zona eufótica é influenciada diretamente pela presença ou ausência de compostos orgânicos ou inorgânicos que dificulta a passagem da luz, portanto enquanto mais composto presente nessa região menor será a profundidade que a luz consegue penetrar, e menor será a medida feita pelo DS (ANA, 2022).

A produtividade aquática depende da transparência da água, portanto baixa transparência dificulta a penetração de raios solares diminuindo assim a fotossíntese a qual reduz a quantidade de oxigênio dissolvido comprometendo a vida aquática; ao mergulhar o Disco de Secchi na água se obtém sua profundidade a partir do desaparecimento desse Disco

de *Secchi*, porque tem relação direta com a transparência da água e relação inversa com a quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos no percurso da luz (PEREIRA FILHO, 2000).

3.6 Incertezas e risco de eutrofização

Embora a avaliação multimodelo de IET possa fornecer uma faixa de atuação para o gerenciamento da eutrofização de corpos hídricos (KLIPPEL *et al.*, 2020), as possíveis divergências entre os resultados finais podem ocasionar a inação do tomador de decisão. Nesse sentido, é possível considerar o conjunto de *outputs* dos modelos de IET para calcular o risco de eutrofização do reservatório investigado por meio do conceito de Função Densidade de Probabilidade (FDP) (CHANG *et al.*, 2015). O valor encontrado a partir do cálculo do risco de eutrofização é uma informação mais conveniente para a tomada de decisão, além de considerar a incerteza estrutural dos modelos de IET e as naturais divergências (CARNEIRO *et al.*, 2022).

Essa abordagem é comum em estudos de impacto das mudanças climáticas em sistemas hídricos, mas não consta na literatura aplicações em estudos de eutrofização pelo método multimodelo IET, ainda mais quando se considera reservatório do semiárido tropical brasileiro.

Neste trabalho, é assumido que a falha (eutrofização do reservatório) ocorre quando o estado trófico excede a capacidade do sistema, a qual é assumido como o limite que define o estado eutrófico, visto que acima deste valor o reservatório é considerado eutrofizado. Então, o risco de eutrofização é definido como a probabilidade de excedência de nível eutrófico ($IET_{eutrófico}$) (ALVES *et al.*, 2020). Como estar demonstrado na expressão matemática a seguir:

$$\text{Risco de eutrofização} = P [IET > IET_{eutrófico}] \quad (14)$$

Em que o IET de referência ($IET_{eutrófico}$) para a caracterização da condição de eutrofização é $IET = 54$, calculado pelos valores limiares entre as classes Mestrófico-Eutrófico ao integrá-los no desenvolvimento da metodologia multimodelo IET de caracterização trófica o qual se constituirá no valor trófico de referência para a escala de intensidade trófica proposta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Modelagem da eutrofização

Neste estudo, uma abordagem combinada entre a avaliação multimodelos IET e o método probabilístico do cálculo de risco de eutrofização foi desenvolvida e aplicada com o objetivo de caracterizar a eutrofização em reservatório do clima semiárido tropical Nordeste.

O reservatório Araras, quarto maior reservatório público federal do Estado do Ceará, de grande importância estratégica para os usos múltiplos da água na região Norte, localizado na bacia hidrográfica do Acaraú, Ceará, Brasil, foi utilizado nesta pesquisa para o estudo de caso.

Utilizou-se a base de dados das concentrações de Fósforo Total (PT), Nitrogênio Total (NT), Clorofila-*a* (Chl-*a*) e a medida da profundidade do Disco de *Secchi* (DS), disponibilizada pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) no período compreendido de agosto de 2009 a janeiro de 2022. Foram selecionadas as campanhas de monitoramento que apresentavam dados simultâneos de PT; NT; Chl-*a*; e DS, excluindo-se as que faltavam dados.

Primeiramente, realizou-se a determinação do nutriente limitante do reservatório Araras por meio dos três modelos: o modelo de Kratzer & Brezonik (1981); o modelo de Carlson (1991); e a razão de Redfield (1958), consistindo dessa forma a avaliação de determinação do nutriente limitante do reservatório Araras compreendendo de agosto de 2009 a janeiro de 2022.

Em seguida, empregou-se os cinco modelos de determinação de IET (Carlson, 1977; Kratzer & Brezonik, 1981; Toledo Júnior *et al.*, 1983; Lamparelli, 2004; Cunha *et al.*, 2013), consistindo dessa maneira a avaliação multimodelo IET de realização da caracterização trófica.

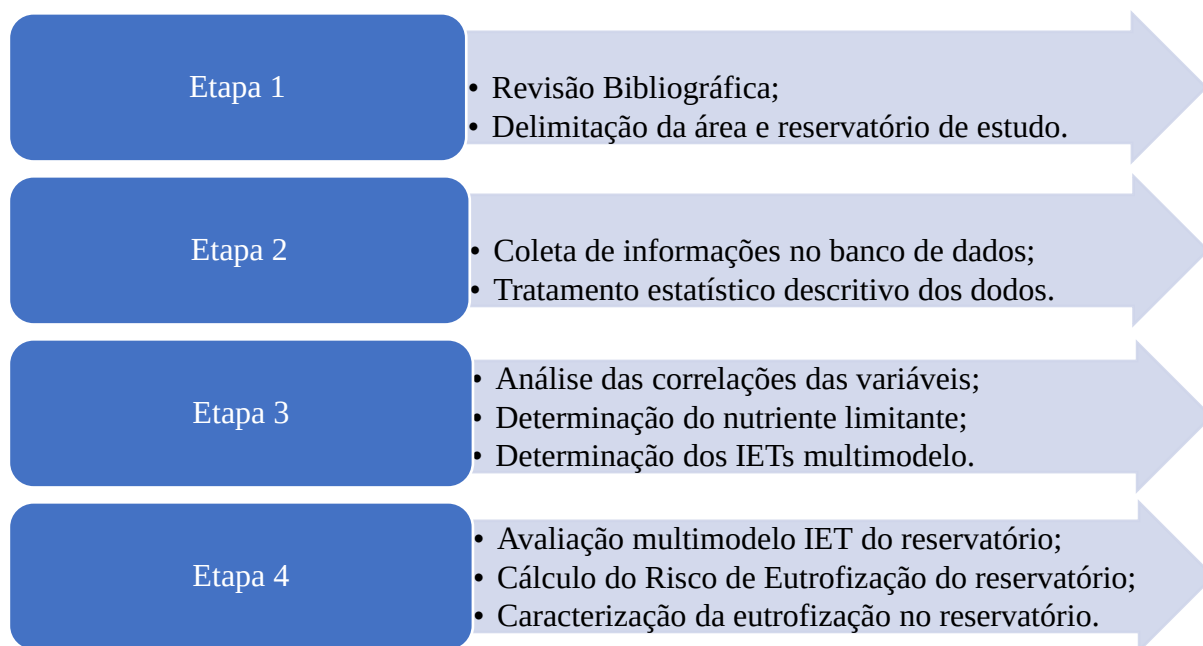
A partir do conjunto dos resultados dos valores dos IETs gerados na avaliação multimodelo IET foi aplicado o método probabilístico do cálculo de risco para determinar o risco de eutrofização do reservatório Araras da série histórica de dados coletados de 2009-2022.

Aplicou-se a estatística descritiva (média, mínimo, máximo, desvio padrão) para o tratamento das variáveis limnológicas (PT, NT, Chl-*a*, DS) e hidroclimáticas (volume percentual e precipitação diária), bem como também foram analisadas as correlações entre os parâmetros de qualidade da água (PT, NT, Chl-*a*, DS) com os seus coeficientes de determinação.

Assim também foram realizadas análises das correlações entre a variável hidroclimática volume percentual do reservatório com os valores IETs multimodelo, bem como realizadas as correlações da variável hidroclimática precipitação diária com os valores de IETs multimodelo.

Na Figura 1 é exibido o fluxograma com as principais etapas de realização desta pesquisa.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia com as etapas principais aplicadas nesta pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Estudo de caso: reservatório Araras

O clima semiárido brasileiro é caracterizado principalmente por uma distribuição espaço-temporal variável e irregular da precipitação, com as elevadas taxas de evaporação (2300 mm/ano), pelas altas temperaturas estáveis (sazonais) e, ocasionalmente, pelos longos períodos de secas que podem ocorrer (CARNEIRO *et al.*, 2014; ROCHA; LIMA NETO, 2022).

Nessa região, as taxas médias de precipitação variam em torno de 550 a 1100 mm/ano e a estação chuvosa compreende o período de janeiro a maio, quando ocorre cerca de 80% da precipitação anual (GUIMARÃES, 2023). O estado do Ceará possui uma área territorial de 150 km², com 175 dos seus 184 municípios (95%) inseridos na região semiárida do Nordeste, é o estado que possui a maior parte de seu território inserido na região semiárida (BRASIL, 2021).

As precipitações no Estado do Ceará possuem uma distribuição espaço-temporal muito irregular, elas se concentram entre os meses de fevereiro e de maio. Por causa das secas recorrentes e devido à temperatura média anual elevada (31 °C), essa região apresenta, na maior parte do ano, balanço hídrico negativo, com as precipitações anuais médias em torno de 900 mm/ano e são elevadas taxas de evaporação potencial (2.000 mm/ano) (ARANHA *et al.*, 2022).

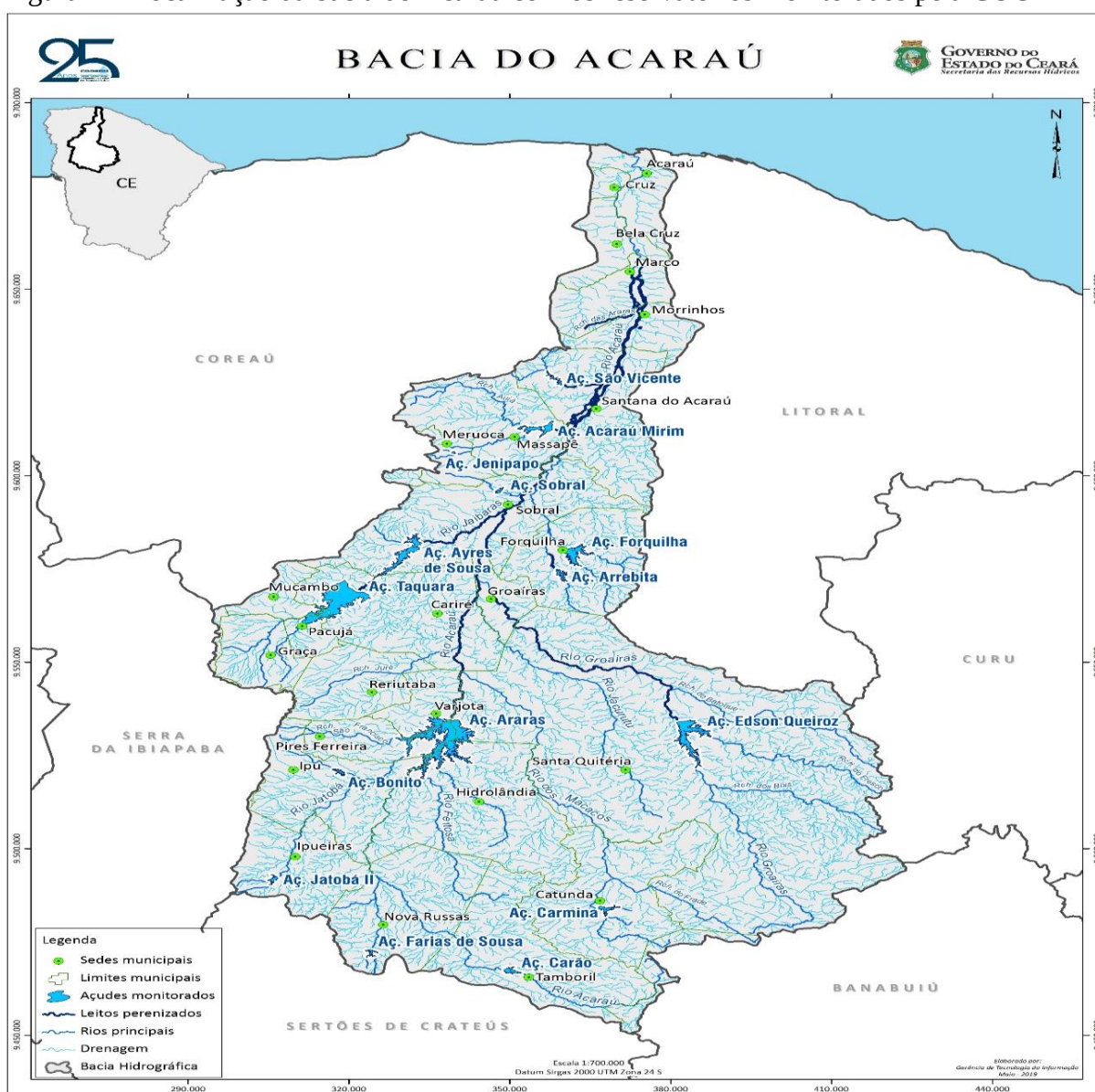
O reservatório Araras, localizado na bacia hidrográfica do Rio Acaraú, foi selecionado para a aplicação da metodologia desenvolvida neste estudo em virtude de muitos aspectos relevantes que o compõe (Figura 2). Trata-se do quarto maior reservatório público federal do

Estado do Ceará, sendo de grande importância estratégica para o abastecimento humano, agricultura, irrigação e indústrias do Norte do estado do Ceará, contribuindo consideravelmente para com o desenvolvimento socioeconômico dessa região do semiárido nordestino brasileiro.

O reservatório Araras tem como finalidade a perenização e controle das cheias do rio Acaraú, da irrigação de 14.000 ha nas várzeas do mesmo rio, além do desenvolvimento da piscicultura e aproveitamento de culturas na área de montante desse (MEIRELES *et al.*, 2017).

Na Tabela 2 estão mostrados a localização da bacia hidrográfica do rio Acaraú e os reservatórios monitorados pela COGERH bem como os municípios que compõem esta bacia.

Figura 2 – Localização da bacia do Acaraú com os reservatórios monitorados pela COGERH



Fonte: COGERH (2018).

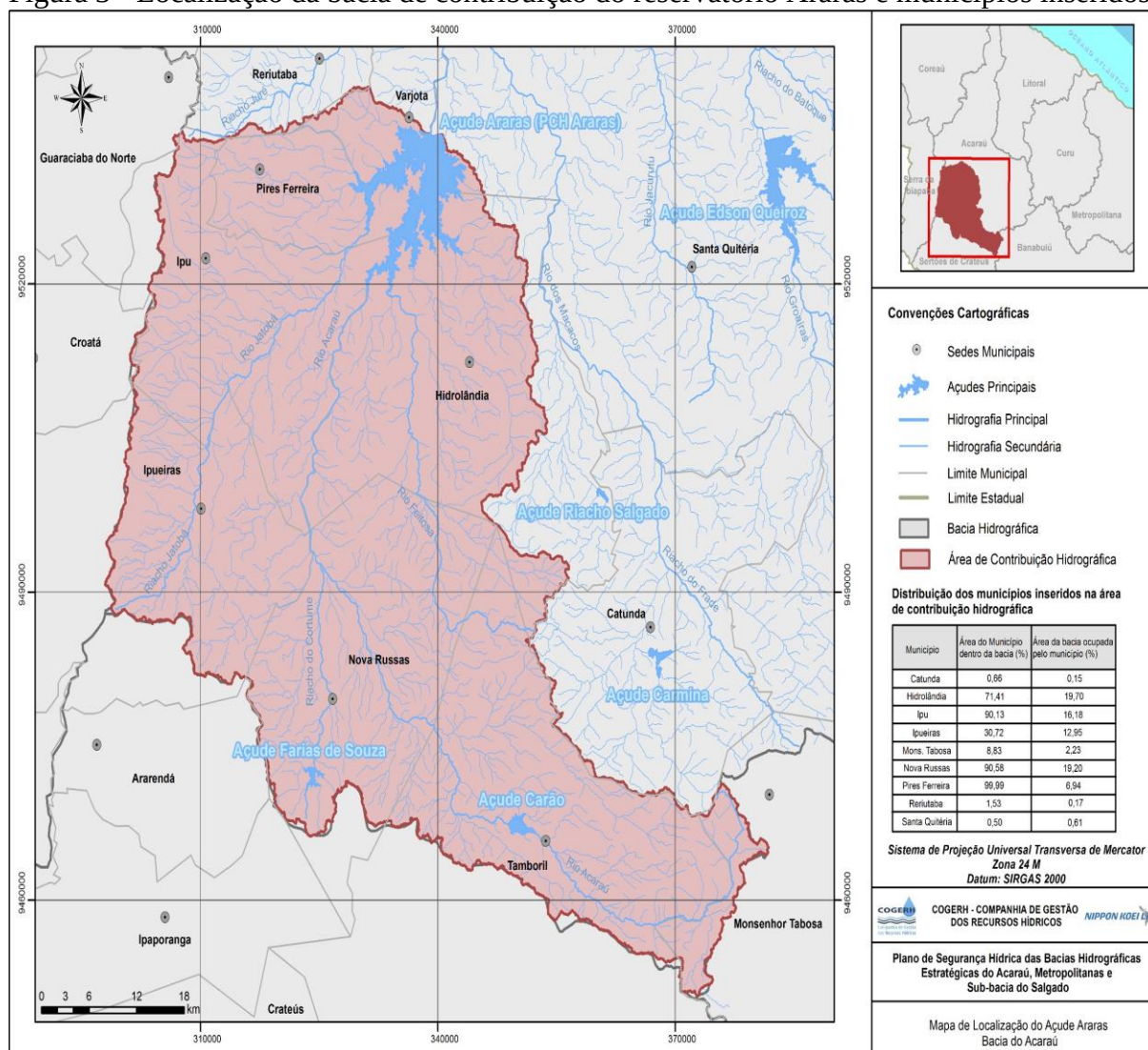
A bacia hidrográfica do Rio Acaraú com área de 14.416 km², corresponde a 10% do território cearense. O principal rio dessa bacia leva o nome da mesma, Acaraú, possuindo uma

extensão de aproximadamente 315 km, no sentido sul-norte, sua nascente é na Serra das Matas em Monsenhor Tabosa-Ce e sua foz é em Acaraú-Ce. Seus principais afluentes são os rios Groaíras, Jacurutu, Macacos e Jaibaras, que formam importantes sub-bacias (COGERH, 2018).

A bacia hidrográfica do Rio Acaraú é composta por 28 municípios e essa bacia hidrográfica apresenta uma capacidade de acumulação de águas superficiais de aproximadamente 1.443.763.000 de m³ considerando a capacidade de acumulação de água dos atuais 15 reservatórios monitorados pela COGERH nessa bacia hidrográfica (COGERH, 2018).

Na Tabela 3 são apresentados a localização da bacia de contribuição do reservatório Araras com a distribuição dos municípios inseridos em sua área de contribuição hidrográfica.

Figura 3 - Localização da bacia de contribuição do reservatório Araras e municípios inseridos



Fonte: COGERH (2017)

O reservatório Araras está sob o contínuo monitoramento da COGERH por meio do seu Programa da Rede de Monitoramento de Qualidade da Água com campanhas de coletas trimestrais, realizando as coletas e análises de diversos parâmetros de qualidade da água: PT,

NT, Chl-*a*, transparência do DS, realizadas geralmente nos meses de fevereiro, maio, agosto e novembro para averiguar a situação trófica dos reservatórios. Outras variáveis importantes no monitoramento de aspectos quantitativos do reservatório também são monitoradas continuamente: vazão afluente, lâmina líquida, evaporação, vazão de retira, volume percentual.

O clima predominante na área de contribuição da bacia hidrográfica do açude Araras é caracterizado como tropical chuvoso, quente e úmido, com concentração das chuvas no outono e temperaturas que variam de 19 °C a 29 °C. A precipitação anual situa-se em torno de 900 mm e o regime de chuva é considerado bastante irregular, com anos de grandes chuvas e outros com grandes secas. E apresenta altitude que varia entre 125 m e 268 m (CPRM, 1998). Na Tabela 4 estão mostradas as principais características de operação do reservatório Araras e suas medidas.

Tabela 4 – Principais características e respectivas medidas de operação do reservatório Araras

Características	Medidas
Início de operação	1958
Área de drenagem (km ²)	3.517
Volume máximo (hm ³)	891
Profundidade máxima (m)	38
Precipitação média da região (mm/ano)	900

Fonte: Elaborado pelo autor.

O reservatório Araras serve às diversas demandas hídricas e atende a diversos municípios com a disponibilidade de suas águas para o abastecimento da população urbana e rural, bem como outras necessidades como abastecimento de indústrias, irrigação, dessedentação de animais e diluição. Na Tabela 5 são exibidas as principais demandas hídricas do reservatório Araras, com os municípios e as respectivas populações abastecidas pelo mesmo.

Tabela 5 – Demandas hídricas, os municípios e população abastecida pelo reservatório Araras

Demandas hídricas	(%)	Municípios abastecidos	População (censo 2020)
Abastecimento urbano	19	Cariré	17.632 hab.
Abastecimento rural	9	Hidrolândia	17.855 hab.
Dessedentação de animais	6	Ipu	41.081 hab.
Irrigação	63	Ipueiras	36.798 hab.
Abastecimento industrial	3	Pires Ferreira	10.606 hab.
Diluição	-	Reriutaba	18.105 hab.
		Varjota	18.606 hab.

Fonte: Adaptado de ANA (2016); IBGE (2022).

4.3 Aquisição de dados

Os dados submetidos às análises neste estudo foram obtidos no Portal Hidrológico do Ceará (<https://www.hidro.ce.gov.br>), desenvolvido em conjunto pela Secretária de Recursos

Hídricos do Ceará (SRH), a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e pela Companhia da Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), que incluem o volume, precipitação, parâmetros físico, químico e microbiológico.

Os dados de qualidade da água que foram utilizados nesta pesquisa foram Fósforo Total (PT), Clorofila-*a* (Chl-*a*), Nitrogênio Total (NT) e Transparência medida pelo Disco de *Secchi* (DS) referente ao período de monitoramento de agosto de 2009 a janeiro de 2022. Também foram coletados para as respectivas datas das campanhas de monitoramento da qualidade da água dados de volume percentual e precipitação diária do período de 2019 a 2022.

4.4 Análise estatística das variáveis limnológicas e hidroclimáticas

Foram realizadas as análises estatísticas descritivas fundamentais (média aritmética, desvio padrão, mínimo, máximo) para as variáveis limnológicas NT, PT, Chl-*a* e DS, bem como das variáveis hidroclimáticas volume percentual e da precipitação diária do reservatório Araras.

Realizou-se as avaliações das correlações empíricas entre essas variáveis limnológicas por meio da técnica de regressão linear simples com o poder explicativo da regressão linear representado pelo coeficiente de determinação, escrevendo o relacionamento entre as variáveis.

Bem como foram realizadas as análises das correlações entre o volume percentual e os parâmetros de qualidade da água; as análises das correlações do volume percentual com os IETs multimodelos; e das análises das correlações da precipitação diária com os IETs multimodelos.

As correlações de todas as variáveis limnológicas e hidroclimáticas foram obtidas por meio da regressão linear simples no software Microsoft Excel® considerando todo o conjunto de dados do monitoramento da qualidade de água disponíveis simultaneamente de 2009 a 2022.

4.5 Determinação da metodologia de avaliação multimodelo IET

Estudo com modelos de estado trófico nos reservatórios do semiárido brasileiro se tornou uma premissa rotineira a ponto de ser considerado imprescindível para as relevantes questões concernentes a recursos hídricos cuja qualidade hídrica é premente em conhecê-la.

Não há unanimidade sobre qual modelo utilizar, com essa flexibilidade metodológica utilizam-se indiscriminadamente um ou outro modelo dentre os cinco modelos principais que incluem o de Carlson (1977) e suas adaptações como se pode constatar em diversas pesquisas.

Então esses cinco modelos (Tabela 6) foram selecionados na investigação da literatura referente ao diagnóstico e indicação do estado trófico de reservatórios do semiárido tropical brasileiro, constituindo a abordagem multimodelo IET de estado trófico do reservatório Araras.

Tabela 6 – Modelos dos IETs para a constituição da metodologia de avaliação multimodelo IET

Autores	Modelo de IET	
Carlson (1977)	$\text{IET(DS)} = 10 \left(6 - \frac{\ln(\text{DS})}{\ln(2)} \right)$	(15)
	$\text{IET(Chl-a)} = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(2,04 - 0,68\ln(\text{Chl-a}))}{\ln(2)} \right] \right\}$	(16)
	$\text{IET(PT)} = 10 \left(6 - \frac{\ln(\frac{48}{\text{PT}})}{\ln(2)} \right)$	(17)
	$\text{IET} = \frac{\text{IET(DS)} + \text{IET(PT)} + \text{IET(Chl-a)}}{3}$	(18)
Kratzer & Brezonik (1981)	$\text{IET(NT)} = 10 \left[6 - \left(\frac{\ln(\frac{1,47}{\text{NT}})}{\ln(2)} \right) \right]$	(19)
	$\text{IET(DS)} = 10 \left(6 - \frac{\ln(\text{DS})}{\ln(2)} \right)$	(20)
	$\text{IET(Chl-a)} = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(2,04 - 0,68\ln(\text{Chl-a}))}{\ln(2)} \right] \right\}$	(21)
	$\text{IET} = \frac{[\text{IET(DS)} + \text{IET(NT)} + \text{IET(Chl-a)}]}{3}$	(22)
Toledo Júnior <i>et al.</i> (1984)	$\text{IET(DS)} = 10 \left[6 - \left(\frac{0,64 + \ln(\text{DS})}{\ln(2)} \right) \right]$	(23)
	$\text{IET(PT)} = 10 \left[6 - \left(\frac{\ln(\frac{80,62}{\text{PT}})}{\ln(2)} \right) \right]$	(24)
	$\text{IET(Chl-a)} = 10 \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,695\ln(\text{Chl-a})}{\ln(2)} \right) \right]$	(25)
	$\text{IET} = \frac{(\text{IET(DS)} + \text{IET(PT)} + \text{IET(Chl-a)})}{3}$	(26)
Lamparelli (2004)	$\text{IET(PT)} = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(-0,42\ln(\text{PT}) + 1,77)}{\ln(2)} \right] \right\}$	(27)
	$\text{IET (Chl-a)} = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(-0,34\ln(\text{Chl-a}) + 0,92)}{\ln(2)} \right] \right\}$	(28)
	$\text{IET} = \frac{[\text{IET(PT)} + \text{IET(Chl-a)}]}{2}$	(30)
Cunha <i>et al</i> (2013)	$\text{IET(PT)} = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(-0,28\ln(\text{PT}) + 1,33)}{\ln(2)} \right] \right\}$	(31)
	$\text{IET (Chl-a)} = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{(-0,25\ln(\text{Chl-a}) + 0,84)}{\ln(2)} \right] \right\}$	(32)
	$\text{IET} = \frac{\text{IET(PT)} + \text{IET(Chl-a)}}{3}$	(33)

Fonte: Adaptado de Klippel *et al.* (2020).

Em que:

IET = Índice de Estado Trófico (adimensional); **DS** = medidas da transparência do disco de *Secchi* (m); **PT** = concentração de Fósforo Total ($\mu\text{g/L}$); **Chl-*a*** = concentração de clorofila-*a* ($\mu\text{g/L}$); **NT** = concentração de Nitrogênio Total (mg/L); **ln** = logaritmo neperiano (valor adimensional).

Cabe ressaltar que o modelo de Kratzer & Brezonik (1981) apenas acrescentou ao modelo de Carlson (1977) a equação referente ao nitrogênio para quando o nutriente limitante for o nitrogênio, pois quando o nutriente limitante for apontado como sendo o fósforo, então a equação para a determinação do IET permanece a desenvolvida pelo modelo de Carlson (1977).

4.6 Determinação do nutriente limitante

Foram aplicadas três diferentes metodologias para a determinação do fator responsável pela produção primária do reservatório Araras. Os modelos de nutriente limitante foram de Kratzer & Brezonik (1981), de Carlson (1991) e a razão NT:PT de Redfield (1958) (Tabela 7).

Tabela 7 – Critérios das metodologias para determinação de nutriente limitante da eutrofização

Modelo de nutriente limitante	Critério metodológico
Kratzer & Brezonik (1981)	Limitação por nitrogênio: $\text{IET}(\text{NT}) - \text{IET}(\text{PT}) < 0 \quad (34)$
	Colimitação: $\text{IET}(\text{NT}) - \text{IET}(\text{PT}) \cong 0 \quad (35)$
	Limitação por fósforo: $\text{IET}(\text{NT}) - \text{IET}(\text{PT}) > 0 \quad (36)$
Carlson (1991)	Limitação por fósforo: $\text{IET}(\text{Chl-}a) \geq \text{IET}(\text{PT}) \quad (37)$
	Limitação por outro fator: $\text{IET}(\text{Chl-}a) < \text{IET}(\text{PT}) \quad (38)$
	Limitação por nitrogênio: $\text{IET}(\text{Chl-}a) \geq \text{IET}(\text{NT}) \quad (39)$
	Limitação por outro fator: $\text{IET}(\text{Chl-}a) < \text{IET}(\text{NT}) \quad (40)$
Redfield (1958)	$\text{Razão} = \frac{[\text{NT}]}{[\text{PT}]} \quad (41)$
	Limitação por fósforo: $\text{NT/PT} > 16:1 \quad (42)$
	Limitação por nitrogênio: $\text{NT/PT} < 16:1 \quad (43)$

Fonte: Wiegand *et al.* (2020).

4.7 Risco de eutrofização

Em posse do conjunto de IETs multimodelo foi determinado o risco de eutrofização do reservatório utilizando a abordagem da Função Densidade de Probabilidade (FDA) (CHANG *et al.*, 2015; ALVES *et al.*, 2020; CARNEIRO *et al.*, 2022). Conforme a equação que se segue:

$$P = \frac{x}{N} \quad (44)$$

Em que:

P é a probabilidade associado ao número de ordem do IET;

x é número de modelos cujo IET for maior do que 54;

N = número total de modelos IET.

É importante ressaltar que quando a avaliação consistiu de um único modelo, na perspectiva do modelo individual, que ocorre quando a avaliação do nutriente limitante coincide para o NT, o resultado se restringiu a probabilidade de 0 ou 100% do risco de eutrofização em função de não exceder ou exceder o valor de referência de eutrofização encontrado (IET = 54).

Assim o risco de eutrofização quando calculado por um único modelo limita a caracterizar o corpo hídrico por um valor único sem a abrangência dos intervalos dos valores quando se considera um conjunto de modelos para compor a avaliação, de modo que possa representar com maior precisão as condições tróficas que realmente o corpo d'água esteja submetido e não conduzir para uma realidade que não existe, seja para uma melhor condição, seja para uma pior condição trófica do reservatório, sem subestimar ou superestimar o resultado.

Portanto quanto maior a quantidade de modelos associados maior a representatividade da avaliação e consequentemente da probabilidade do cálculo do risco de eutrofização condizerem com resultados fidedignos com as reais condições tróficas predominantes no sistema aquático, contornando assim a limitação que a utilização de um único modelo pode acarretar quanto à classificação ou caracterização da eutrofização em reservatório do semiárido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação das variáveis limnológicas, volume percentual e precipitação diária

Na Tabela 8 são mostrados os dados das variáveis NT, PT, Chl-*a*, DS, volume percentual e precipitação para o reservatório Araras entre agosto de 2009 a janeiro de 2022, considerando as datas que os dados das variáveis estão simultaneamente disponíveis no Portal Hidrológico do Ceará, desconsiderando, portanto, datas que estavam com um ou mais dados indisponíveis.

Tabela 8 – Dados dos parâmetros NT, PT, Chl-*a* e DS, volume percentual e precipitação diária.

Data	NT (mg/L)	PT (µg/L)	Chl- <i>a</i> (µg/L)	DS (m)	Volume percentual (%)	Precipitação diária (mm)
20/08/2009	4,539	185	21,05	1,4	97,9	0,0
05/05/2010	0,981	90	15,00	0,5	71,1	1,1
29/11/2010	0,730	91	25,00	0,5	50,1	0,1
24/10/2012	0,152	77	36,60	0,7	55,0	0,0
08/05/2013	0,158	46	09,10	0,7	38,7	1,0
05/11/2014	3,110	90	114,7	0,4	9,40	0,0
29/04/2015	1,180	164	169,0	0,3	7,20	0,6
28/07/2015	2,910	170	139,4	0,3	6,50	0,0
08/03/2016	4,162	198	199,4	0,2	3,90	0,2
06/04/2016	3,662	209	187,6	0,2	3,90	8,8
09/08/2016	3,063	200	187,5	0,3	4,50	0,0
07/11/2016	5,412	183	219,6	0,3	3,60	0,0
24/01/2017	4,175	358	164,2	0,3	3,40	1,1
24/04/2017	2,850	177	72,69	0,6	14,7	6,9
24/07/2017	1,560	106	51,46	0,9	14,2	2,0
24/10/2017	1,688	67	35,04	1,1	10,4	0,0
11/01/2018	1,712	48	31,66	0,9	7,50	0,5
11/04/2018	1,450	85	33,36	1,0	18,1	44
12/07/2018	1,750	140	26,74	0,7	29,7	0,0
04/10/2018	1,100	64	28,16	0,7	24,0	3,5
10/01/2019	1,062	61	29,13	0,9	19,1	11,3
11/04/2019	1,220	90	25,40	0,8	46,4	3,2
11/07/2019	1,513	146	83,50	0,8	66,6	0,3
10/10/2019	1,099	47	23,04	0,9	59,6	0,0
16/01/2020	0,390	47	10,01	1,9	54,3	5,4
12/05/2020	0,725	46	17,63	1,6	100	0,2
11/08/2020	0,840	33	09,60	1,6	96	0,0
10/11/2020	0,880	27	12,24	1,5	84,7	0,1
14/01/2021	0,680	26	08,19	2,3	79,3	2,8
08/04/2021	0,720	39	03,75	3,1	78,4	0,4
08/07/2021	0,790	37	11,03	2,0	81	0,0
06/10/2021	0,590	23	06,38	2,1	70,8	0,0
12/01/2022	0,688	45	06,45	2,60	63,5	6,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 8, com alguns recortes, considerando situações volumétricas críticas e não críticas, no período global de 2009 e 2022, observa-se que a situação mais crítica do reservatório

Araras foi entre 2014 e 2017, com média de 5,3% de sua capacidade hídrica de armazenamento, inclusive apresenta volume percentual na casa dos 3% nesse período, já para a situação não crítica, ao fazer a média volumétrica percentual, encontra-se 54%, ressalta-se nesse período que algumas datas das campanhas do monitoramento, o reservatório apresenta o volume de 100%.

A partir da Tabela 8, observa-se que os valores máximos das variáveis químicas (nutrientes) e da variável biológica (clorofila-*a*), bem como o valor mínimo da variável física (medida do DS), apresentam os resultados mais preocupantes quanto à degradação da qualidade da água constatados quando o volume percentual do reservatório estava em situação volumétrica crítica 3,40%; 3,60%; 3,90%, submetido a condições mais intensas de eutrofização.

Pode-se constatar também que os valores mínimos das concentrações das variáveis, assim como o valor máximo da transparência da água, correspondem ao volume percentual de 55%, 70% e 78%, respectivamente, logo os melhores resultados dessas variáveis são apresentados quando o volume percentual do reservatório estava acima de 50% da capacidade.

Evidencia-se na Tabela 8 que quando o reservatório estava com quase ou em sua capacidade máxima de armazenamento, ou seja, com volume percentual de 84%, 96%, 97% e 100% não foi quando as variáveis limnológicas apresentaram os melhores resultados, portanto embora o volume seja a variável que mais influência nas condições tróficas, em situação volumétrica com maior aporte hídrico, existem outras variáveis que afetam a dinâmica trófica.

A precipitação pode assumir a posição de variável determinante, pois governa o escoamento superficial e a oscilação do volume percentual, afetando a concentração dos nutrientes e partículas orgânicas e inorgânicas na água, tanto pelo aumento do material alóctone carreado, quanto pela sua diluição, assim as concentrações sofrem forte influência da pluviometria, mas não se pode apontar se as precipitações diárias no período avaliado (Tabela 8) tenham exercido influência sobre as variáveis limnológicas, nem mesmo com a máxima precipitação diária 44mm, e pode ser explicado em função do tempo de concentração da bacia.

Nas condições semiáridas a estiagem e secas são frequentes, nessas circunstâncias não há efeito direto da precipitação quanto a escoamento, mas sim a diminuição do volume do reservatório, então outros fatores passam a ter suas influências mais intensificadas, agravado pelo uso e ocupação do solo com agricultura e pecuária, sendo que as primeiras chuvas principalmente as mais intensas e pelas características do solo e vegetação da Caatinga carregam os nutrientes para o reservatório desencadeando ou intensificando as condições de eutrofização.

Os resultados indicaram que quando o reservatório estava com os menores volumes percentuais as variáveis NT, PT, Chl-*a* e DS apresentaram seus resultados mais preocupantes de qualidade da água; que os parâmetros Chl-*a* (42% do período avaliado) e PT (91% do

período avaliado), (Tabela 8), estavam em desacordo com os limites de concentrações estabelecidos na Resolução CONAMA N° 357/2005, que recomenda, para ambientes aquáticos lênticos de água classe II, concentração de P < 0,03 mg/L e Chl-*a* < 30 µg/L (BRASIL, 2005).

Essas constatações estão de acordo com Araújo e Bronstert (2016) que concluíram que devido ao longo período de seca, 2012-2017, enfrentado no estado do Ceará percentuais volumétricos inferiores a 50% foram registrados para a maioria das bacias hidrográficas, logo a dinâmica trófica em razão do volume percentual foi seriamente afetada nesse período de seca.

Na Tabela 9 está apresentada a estatística descritiva dos dados das variáveis limnológicas (NT; PT; Chl-*a*; DS) e hidroclimáticas (volume percentual e precipitação) avaliadas para o reservatório Araras a partir do intervalo de agosto de 2009 a janeiro de 2022.

Tabela 9 – Resultados da estatística descritiva das variáveis avaliadas para o reservatório Araras

	NT (mg/L)	PT (mg/L)	Chl-<i>a</i> (µg/L)	D. S. (m)	Volume percentual (%)	Precipitação diária (mm)
Mínimo	0,152	0,023	3,75	0,20	3,40	0,00
Máximo	5,412	0,358	219,62	3,10	100	44,0
Média	1,744	0,103	61,015	1,03	41,62	3,03
Des. Padrão	1,387	0,075	68,235	0,750	33,07	7,89
Confiança	95%	95%	95%	95%	95%	95%
N	33	33	33	33	33	33

Fonte: Elaborado pelo autor.

As variáveis limnológicas e hidroclimáticas do reservatório Araras foram avaliadas por meio da análise estatística descritiva do conjunto de dados, conforme o histórico de monitoramento realizado mediante as campanhas de agosto de 2009 a janeiro 2022 (Tabela 9).

Na Tabela 9 está mostrado a partir da análise estatística descritiva que as concentrações de NT foram em média de 1,744 mg/L, com desvio padrão de $\pm 1,387$ mg/L, com concentração mínima de 0,152 mg/L e com máxima de 5,412 mg/L, durante o monitoramento de 2009 a 2022.

E quanto às concentrações de PT no reservatório durante o período de 2009 a 2022 foram em média de 0,103 mg/L, com $\pm 0,075$ mg/L de desvio padrão, e apresentou uma concentração mínima de 0,023 mg/L e com a máxima concentração de 0,358 mg/L (Tabela 9).

Para a Chl-*a* o valor médio geral da concentração dessa variável foi de 61,015 µg/L, com o desvio padrão de $\pm 68,235$ µg/L, e apresentando a concentração mínima de 3,75 µg/L e com máxima correspondendo a 219,62 µg/L (Tabela 9) no monitoramento feito de 2009 a 2022.

Quanto à medida da variável DS, com contagem amostral e nível de confiança iguais às demais 33 e 95% e para o mesmo período, apresentou a profundidade variando de 0,20 m a 3,10 m, e com o valor médio de 1,03 m, e o desvio padrão dessa média atingiu $\pm 0,75$ m (Tabela 9).

Em relação à variável hidroclimática volume percentual, foi obtido a média de 41,62%, com desvio padrão $\pm 33,07\%$, com percentual mínimo de 3,40% e máximo de 100% do volume de armazenamento do reservatório, de acordo com o levantamento hídrico feito de 2009 a 2022.

No que diz respeito à variável hidroclimática precipitação diária, obteve-se a média de 3,03mm; desvio padrão de $\pm 7,89$ mm; com precipitação mínima de 0,00 mm e precipitação máxima de 44,00 mm considerando o período de monitoramento compreendido de 2009 a 2002.

De acordo com as médias de 0,102mg/L (PT) e 61,015 $\mu\text{g/L}$ (Chl-*a*), segundo as referências estabelecidos na CONAMA 357, o reservatório estava em condição de eutrofização fora do recomendado durante todo o período de 2009 a 2022 ressaltando a média volumétrica percentual de 41,62%, que ao fragmentá-lo fica mais nítido as relações de dependência entre si.

Ao considerar o período de abril/2014 a janeiro/2017, situação considerada mais crítica do reservatório, com média volumétrica percentual de 5,3%, cujas médias das variáveis foram 3,46mg/L (NT); 196,5mg/L (PT); 173,2 $\mu\text{g/L}$ (Chl-*a*) e 0,29m (DS), constata o quanto o volume percentual pode influenciar nas condições tróficas do reservatório em razão das concentrações.

Considerando que a Chl-*a* é o melhor indicador da eutrofização, constata-se que esse parâmetro seja realmente o que sofre maior influência em relação ao volume percentual, pois comparando o período mais crítico (2014 a 2017) com apenas 5,3% do seu volume e o restante do período em que a média foi de 54%, a Chl-*a* reduziu de 173 para 22 $\mu\text{g/L}$, ou seja, as condições tróficas do reservatório melhoraram 87,25% com o aumento do volume percentual.

A Chl-*a* constitui a turbidez biótica e é a variável que mais pode contribuir com a turbidez na água, por isso é a causa da menor profundidade que a luz solar atinge na coluna d'água, então pode ser apontada como a razão principal da menor profundidade atingida pelo DS, por isso com o volume percentual de 5,3%, observa-se que o DS mediu uma profundidade média de apenas 0,29 m e com o volume percentual de 54 % a profundidade média atingida pelo DS foi de 1,32m, isso reflete o quanto a concentração do material, ou partículas, em suspensão presente na água é em consequência precípua da diminuição do volume percentual.

As concentrações de NT foram em média 3,46mg/L (volume percentual de 5,3%) e 1,11mg/L (volume percentual de 54%), então quando o volume percentual do reservatório esteve na média de 54%, a concentração desse nutriente estava conforme a Resolução CONAMA 357, que recomenda para águas doces de classes 2, quando o nitrogênio for fator limitante para eutrofização, o valor do NT não ultrapassar 1,27 mg/L, para ambientes lênticos.

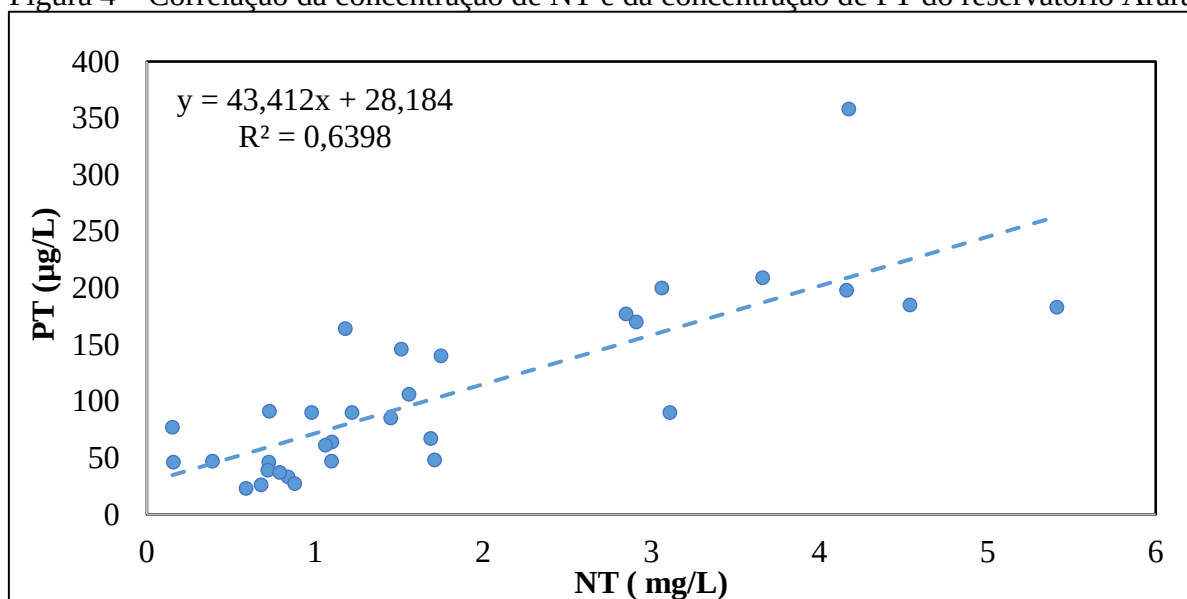
Esses resultados estão corroborando com os estudos de Wiegand *et al.* (2021) que constataram que em um período extremamente seco, entre os anos de 2012 e 2017, em que mais de 90% de 65 reservatórios localizados na região semiárida cearense apresentaram aumento do índice de estado trófico, alcançando as suas piores condições de eutrofização para esse período.

5.2 Correlações empíricas dos parâmetros de qualidade da água

Nas Figuras de 4 a 9 são exibidas as correlações empíricas geradas entre os parâmetros de qualidade da água NT, PT, Chl-*a* e DS. Também são apresentadas as expressões matemáticas que descrevem as relações entre essas variáveis e o poder representativa do coeficiente de determinação (R^2) das correlações obtidas para o reservatório Araras no período de 2009 a 2022.

Na Figura 4 é exibido a correlação empírica entre a concentração de NT e a concentração do PT considerando o período de acompanhamento da qualidade da água do reservatório Araras das campanhas dos monitoramentos realizadas sobre as condições tróficas.

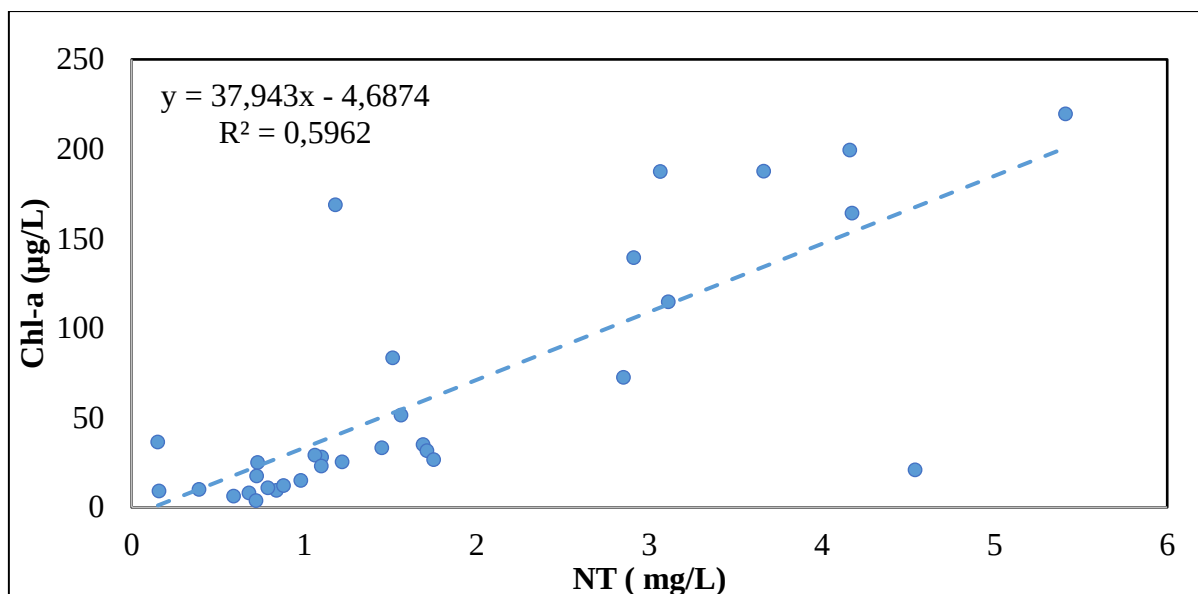
Figura 4 – Correlação da concentração de NT e da concentração de PT do reservatório Araras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5 é mostrado a correlação empírica entre a concentração da variável NT e a concentração da variável Chl-*a* do monitoramento da qualidade da água do reservatório Araras, feita com base nos dados levantados pelas campanhas de monitoramentos realizadas periodicamente, em geral, a cada três meses, para averiguar as condições tróficas das águas do reservatório mediante coletas feitas em pontos estratégicos do corpo hídrico a partir das quais as análises laboratoriais são realizadas e juntamente com as mediadas das transparências registradas pelo DS constituem nas variáveis que compõem os parâmetros de qualidade da água.

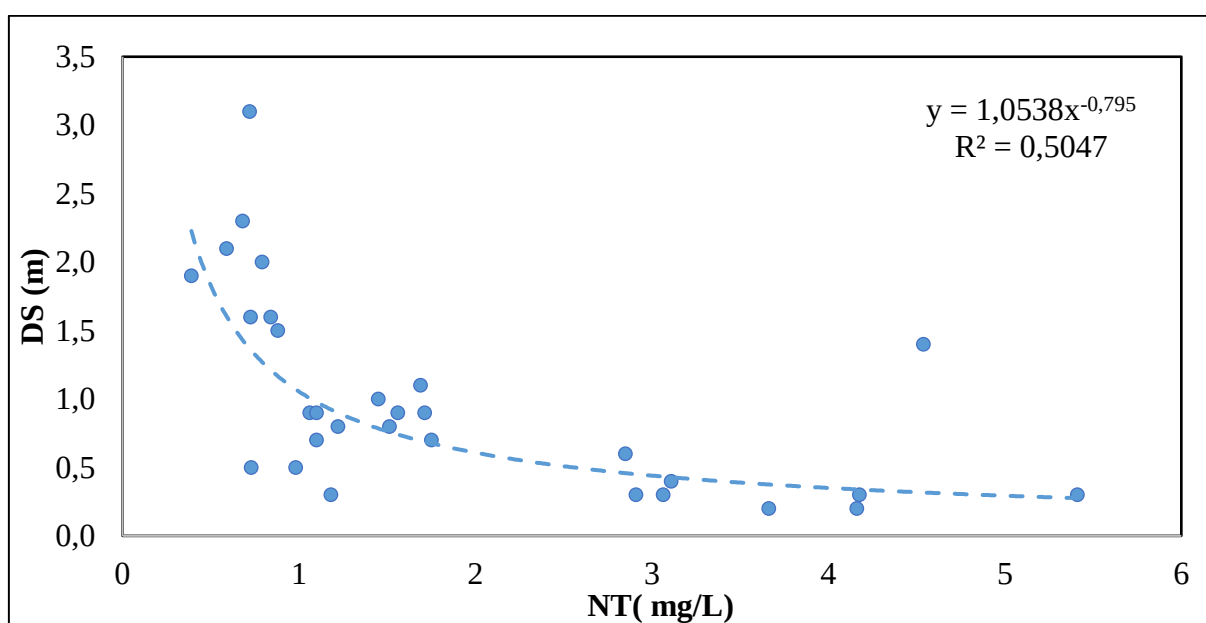
Figura 5 – Correlação da concentração de NT e da concentração de Chl-*a* do reservatório Araras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 6 está mostrado a correlação empírica entre a concentração da variável NT e as medidas da variável do DS dos monitoramentos da qualidade da água do reservatório Araras.

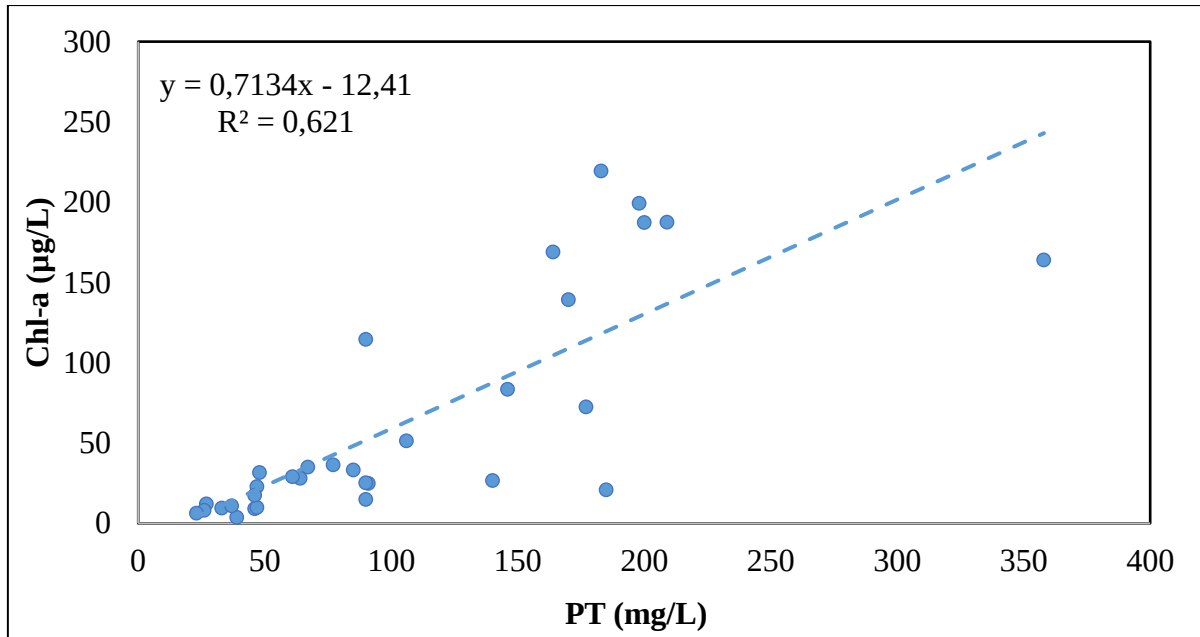
Figura 6 – Correlação entre a concentração do NT com as medidas do DS do reservatório Araras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 7 é exibido a correlação empírica entre a concentração da variável PT e a concentração da variável Chl-*a* do monitoramento da qualidade da água do reservatório Araras, feita com base nos dados do monitoramento da qualidade da água realizada sistematicamente, em geral, trimestralmente, em pontos de coleta estrategicamente selecionados de modo que melhor se tenham informações homogêneas da realidade da qualidade da água em sua extensão.

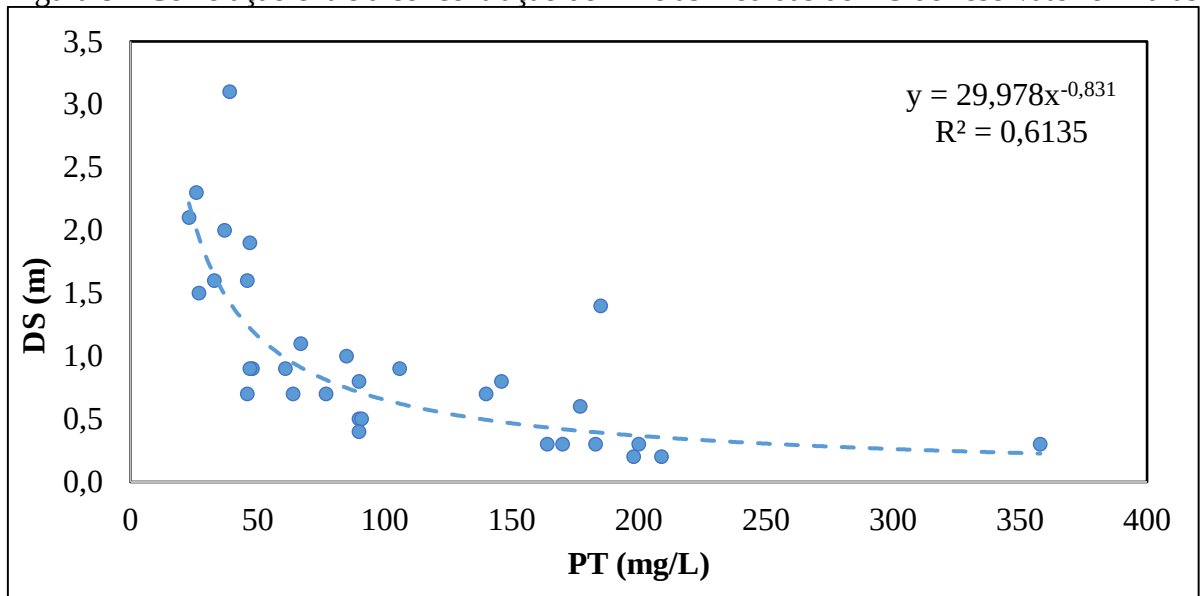
Figura 7 – Correlação da concentração do PT e concentração de Chl-a do reservatório Araras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 8 está mostrada a correlação empírica entre a concentração da variável PT e as medidas da variável do DS do acompanhamento da qualidade da água do reservatório Araras.

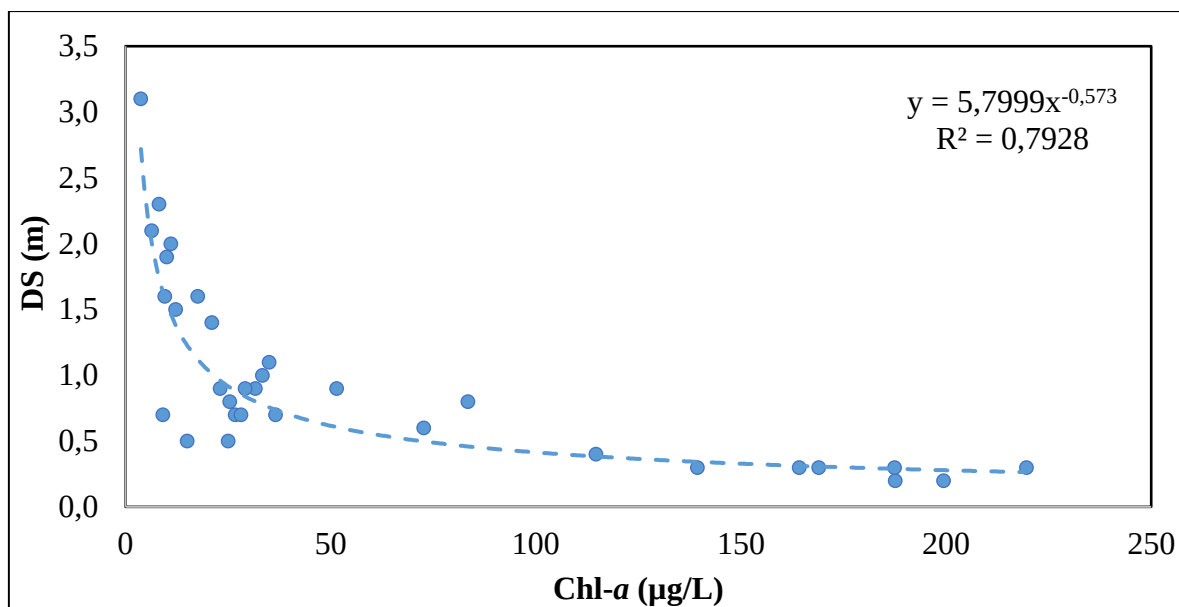
Figura 8 – Correlação entre a concentração do PT e as medidas do DS do reservatório Araras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 9 está mostrado a correlação entre a concentração da variável Chl-a e as medidas da variável do DS sobre o monitoramento da qualidade da água do reservatório Araras, feita com base nos dados gerados a partir das campanhas de monitoramento das condições tróficas das águas do reservatório pelas variáveis limnológicas que constituem os parâmetros.

Figura 9 – Correlação da concentração da Chl-*a* e das medidas do DS do reservatório Araras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 10 está mostrado a capacidade representativa pela métrica de performance que o coeficiente de determinação (R^2) das correlações foi superior a 0,5 para todas as relações entre os parâmetros de qualidade da água do reservatório Araras para o período de 2009 a 2022.

Segundo Moriasi *et al.* (2015), os critérios de avaliação de desempenho estatístico de correlações de NT classificam-se em quatro grupos: Muito Bom ($R^2 > 0,7$); Bom ($0,6 < R^2 \leq 0,7$); Satisfatório ($0,3 < R^2 \leq 0,6$); Insatisfatório ($R^2 \leq 0,3$). Esses mesmos critérios também valem para avaliar o desempenho estatístico do PT, classificando-o em quatro grupos: Muito Bom ($R^2 > 0,8$); Bom ($0,65 < R^2 \leq 0,8$); Satisfatório ($0,4 < R^2 \leq 0,65$); Insatisfatório ($R^2 \leq 0,4$).

Portanto, todas as correlações apresentadas neste estudo mostram-se satisfatórias, evidenciadas pelas fortes correlações, conforme a Tabela 10, entre as concentrações desses nutrientes, NT e PT, em relação aos demais parâmetros, Chl-*a* e DS, sobre a qualidade da água.

Tabela 10 – Resumo dos resultados das correlações entre as variáveis para o reservatório Araras

Correlação	Coeficiente de determinação (R^2)	Equação
PT e NT	0,6398	$y = 43,412x + 28,184$
Chl- <i>a</i> e NT	0,5962	$y = 37,943x - 4,6874$
DS e NT	0,5047	$y = 1,0538x^{-0,795}$
Chl- <i>a</i> e PT	0,6210	$y = 0,7134x - 12,41$
DS e PT	0,6135	$y = 29,978x^{-0,831}$
DS e Chl- <i>a</i>	0,7928	$y = 5,7999x^{-0,573}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Tabela 10 que existe uma forte correlação entre as concentrações do NT e as concentrações do PT, apresentando dessa forma uma tendência de aumento da concentração

do nutriente NT com o aumento da concentração do nutriente PT, portanto essa tendência de aumento proporcional é confirmada pelo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,63980$).

Observa-se na Tabela 10 uma forte correlação entre as concentrações de NT e as concentrações de Chl-*a*, uma vez que a concentração do parâmetro biológico (Chl-*a*) tende a aumentar à medida que aumenta a concentração do parâmetro químico (NT), logo o valor do coeficiente de determinação indica essa forte relação entre essas duas variáveis ($R^2 = 0,5962$).

A concentração de NT em relação às medidas do DS apresenta uma forte correlação, pois com o aumento do valor das concentrações de NT implica na redução do valor da variável física (DS), assim o aumento da concentração do NT pode implicar indiretamente uma menor profundidade atingida pela luz solar consequentemente menor profundidade atingida pelo DS. Essa relação de causa e efeito das variáveis é confirmada pelo valor do $R^2=0,5047$ (Tabela 10).

Observa-se, na Figura 10, que o aumento da concentração da variável PT implica no aumento da concentração da variável Chl-*a*. Essa forte relação de causa e efeito entre essas duas variáveis limnológicas está confirmada pelo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,610$).

A concentração do PT e a medida do DS apresenta forte correlação, assim se observa na Tabela 10 que o aumento da concentração do PT implica na diminuição indireta das medidas de profundidade atingida pelo DS, essa forte correlação verificada de causa e efeito existentes entre as variáveis PT e DS se confirma pelo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,6135$).

A concentração de Chl-*a* e a medida do DS apresenta forte correlação, então constata-se pela Tabela 10, que o aumento da concentração da Chl-*a* implica na redução dos valores da medida do DS, o alto valor do R^2 igual a 0,7928 confirma essa forte relação de causa e efeito entre as concentrações de Chl-*a* e a diminuição da profundidade da variável de medida do DS.

As concentrações da Chl-*a* em relação às concentrações do PT, os resultados estão corroborando com os estudos de Rocha *et al.* (2019), que analisaram as relações entre as concentrações de PT e as concentrações de Chl-*a* em reservatórios do Ceará e observaram que os valores de Chl-*a* seguiram a mesma tendência de variação da concentração de PT ($R^2 = 0,65$).

Esses parâmetros são substâncias químicas (PT; NT) e biológica (Chl-*a*), portanto implicam no aumento das concentrações desses materiais ou partículas na água, logo são as principais causas da diminuição das medidas atingidas pelo DS, quanto maior a concentração de substâncias ou partículas suspensas presentes na água menor será o valor atingido pelo DS.

Essas correlações que existem entre as variáveis limnológicas consistem das relações entre as variáveis de causa (PT; NT) e efeito (Chl-*a*) que caracteriza o fenômeno da eutrofização, enquanto maior a concentração de partículas suspensas na água menor o valor

medido pelo DS, essa concentração dificulta a fotossíntese pela menor quantidade de luz o que afeta direta ou indiretamente a dinâmica do ecossistema aquático intensificando a eutrofização.

Estes resultados estão corroborando com o estudo de Bilgin (2020), que utilizou o método da análise de correlação e demonstrou a dependência que existe entre esses parâmetros de qualidade de água (NT, PT, DS e Chl-*a*), no estudo uma alta correlação positiva foi encontrada entre PT e DS (0,82) e a mais baixa correlação foi observada entre NT e DS (0,54).

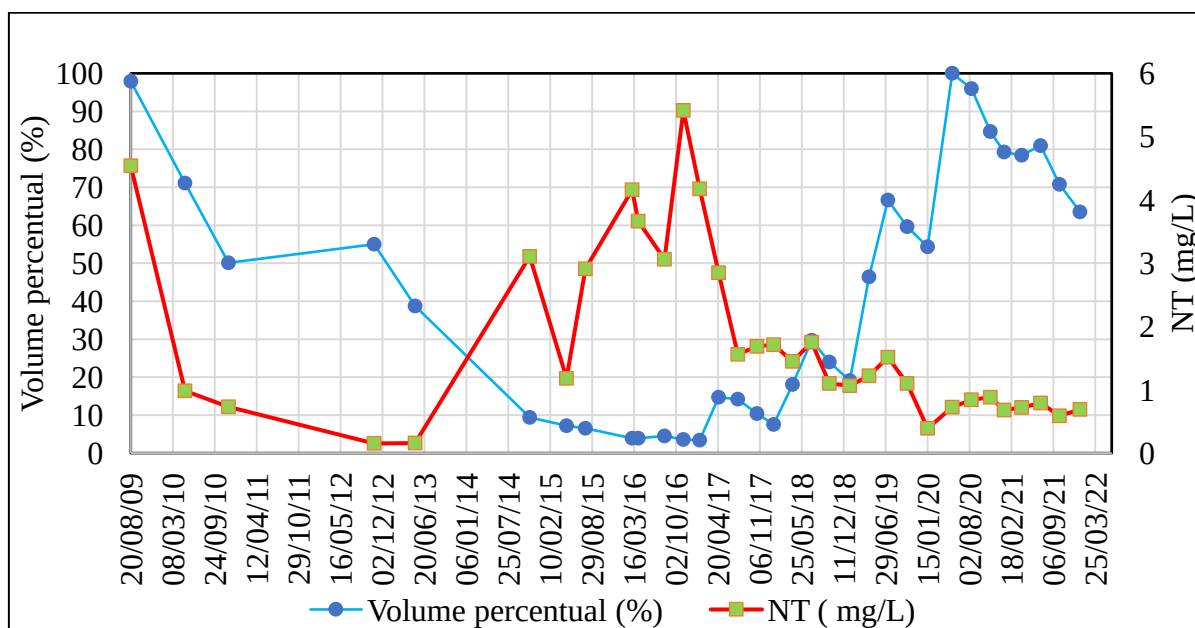
Os resultados deste trabalho também estão de acordo com os resultados de Freire & Sousa Filho (2022), visto que eles identificaram que os indicadores de eutrofização como clorofila-*a*, nitrogênio, fósforo e medidas do disco de Secchi estão intrinsecamente relacionados entre si, de maneira especial as concentrações de clorofila-*a* relacionadas a demais parâmetros.

Pode-se confirmar então que todos esses parâmetros de qualidade da água demonstraram, portanto, que guardam relações de causa e efeito limnológicas importantes entre eles, que foram demonstradas pelo comportamento matemático e pelos valores dos coeficientes de determinação, demonstrando assim que a correspondência entre essas variáveis limnológicas está fortemente consistente para a caracterização da realidade do estado trófico do reservatório.

5.3 Correlações empíricas entre o volume percentual e os parâmetros de qualidade

Nas Figuras de 10 a 13 estão mostrados os valores do volume percentual do reservatório Araras associados aos resultados dos parâmetros de qualidade da água NT, PT, Chl-*a* e DS, considerando a sucessão histórica dos dados de monitoramento do período de 2009 e 2022.

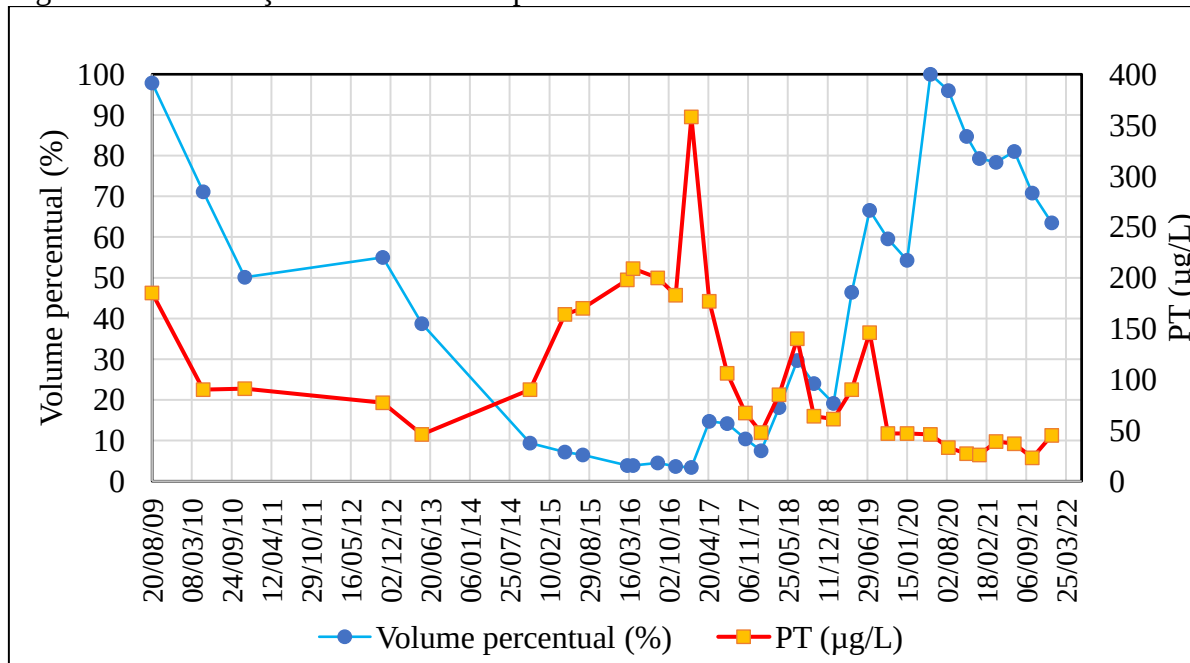
Figura 10 – Correlação do volume percentual com o Nitrogênio Total do reservatório Araras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 11 está mostrado a correlação da variável hidroclimática volume percentual do reservatório Araras associado às concentrações da variável do PT do monitoramento da qualidade da água do período da análise compreendido entre agosto de 2009 a janeiro de 2022.

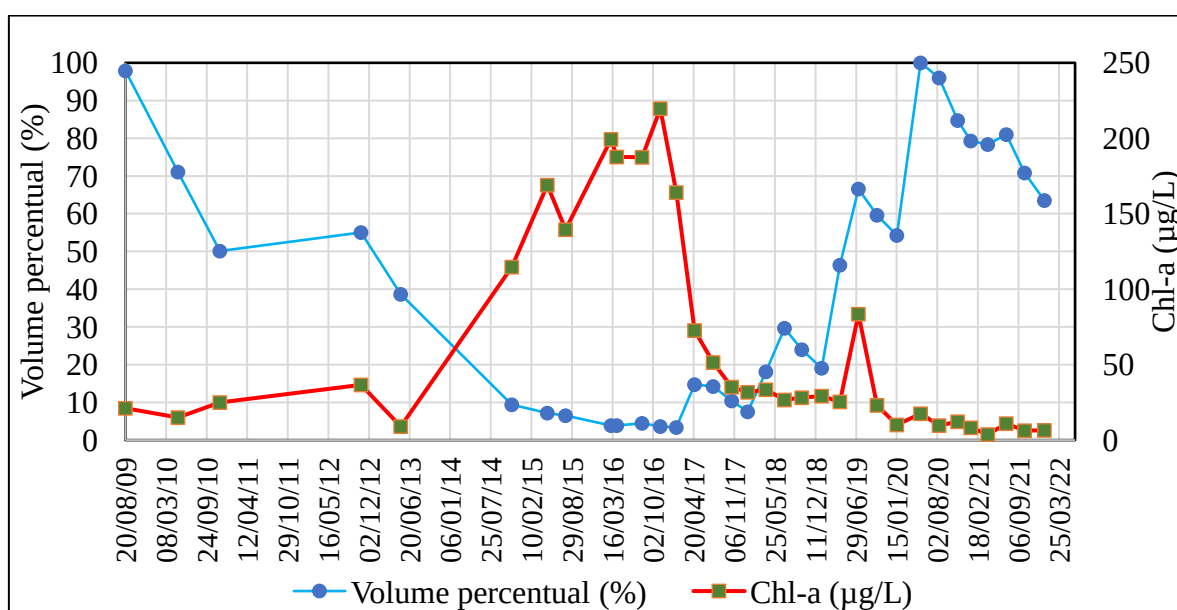
Figura 11 – Correlação entre o volume percentual do reservatório Araras e a variável Fósforo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 12 é exibido a correlação do volume percentual associado às concentrações da Chl-*a* do monitoramento da qualidade da água para o reservatório Araras entre 2009 a 2022.

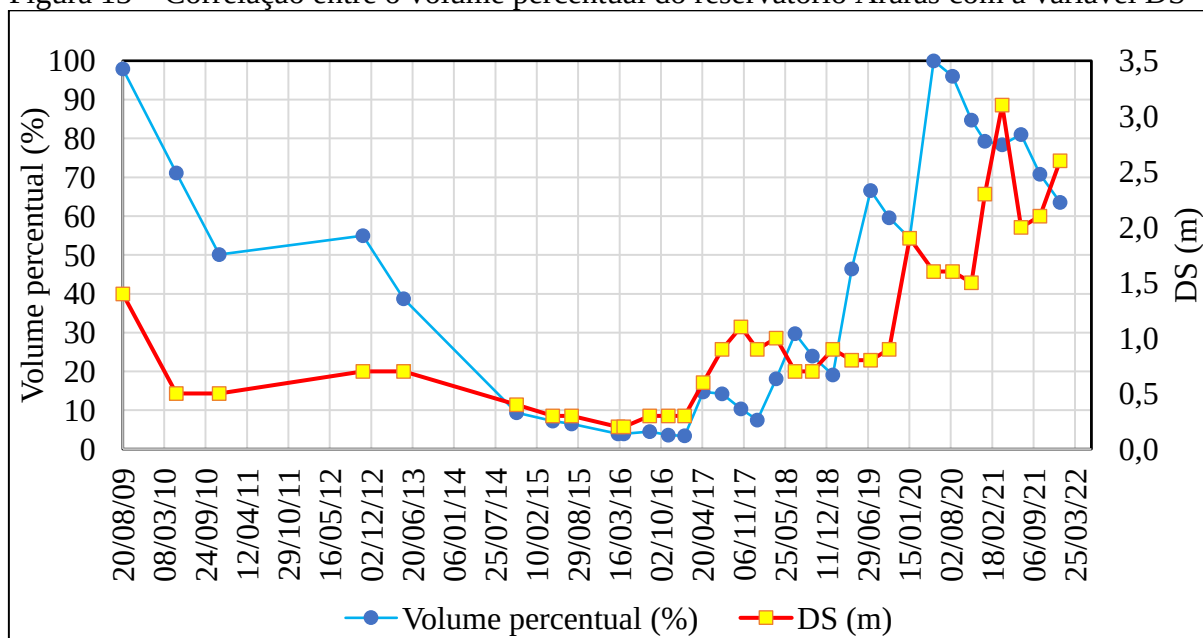
Figura 12 – Correlação entre o volume percentual do reservatório Araras com a Clorofila-*a*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13 é mostrada a correlação da variável hidroclimática volume percentual associado às medidas da variável transparência da água atingida pelo DS do monitoramento da qualidade da água do reservatório Araras compreendido o de agosto de 2009 a janeiro de 2022.

Figura 13 – Correlação entre o volume percentual do reservatório Araras com a variável DS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 10 é observado que existe uma forte relação de dependência entre as concentrações do NT com o volume percentual. Embora com certa variabilidade, quando o volume diminui, a concentração de NT aumenta. Ressalta-se que os menores volumes percentuais do reservatório correspondem às maiores concentrações de NT, por outro lado, com os volumes percentuais elevados no reservatório implicam em menores concentrações para NT.

Na Figura 11 é constatado que existe uma relação de dependência entre as concentrações de PT e o volume percentual. Embora haja alguma variabilidade, quando o volume diminui a concentração de PT aumenta. Salienta-se que o período de menor volume percentual do reservatório corresponde às maiores concentrações de PT, entretanto com volumes percentuais elevados implicam nas menores concentrações de PT, principalmente no final do período citado.

Na Figura 12 é apontado que existe forte relação entre as concentrações de Chl-*a* e o volume percentual, mesmo havendo certa variabilidade, quando o volume diminui, a concentração de Chl-*a* aumenta. Destaca-se que o período de menor volume percentual do reservatório correspondem às maiores concentrações de Chl-*a*. Já com os volumes percentuais mais elevados implicaram em menor concentração da Chl-*a*, notadamente no final do período.

Na Figura 13 é mostrado que existe relação de dependência muito forte entre as medidas do DS e o volume percentual do reservatório. Mesmo com variabilidade, quando o volume

percentual diminui também diminui as medidas do DS. Destaca-se que o período de menor volume percentual corresponde proporcionalmente aos menores valores de DS, e com volumes percentuais mais elevados, maiores são os valores do DS, destacadamente no final do período.

Esses resultados estão de acordo com os resultados de Magalhães (2023), que realizou um estudo de análise e predição de Chl-*a* em 155 reservatório do Ceará, e seus resultados denotaram que a dinâmica sazonal induziu mudanças significativas na qualidade da água na maioria dos reservatórios que foram analisados, de maneira que as concentrações da variável Chl-*a* mostram tendência crescente com a redução do volume de acumulação e também o aumento da concentração das variáveis de NT e PT dos reservatórios durante o período de seca.

Esses resultados corroboraram com o encontrado por Markad *et al.* (2019) que realizando um estudo de modelagem de estado trófico, considerando Chl-*a*, PT e DS, concluíram que esses parâmetros pioravam gradativamente à medida que diminuía o nível da água do reservatório, apresentando os piores resultados no verão, atribuindo que a melhora da qualidade da água se dava em razão da diluição com aumento do volume percentual ocorrendo.

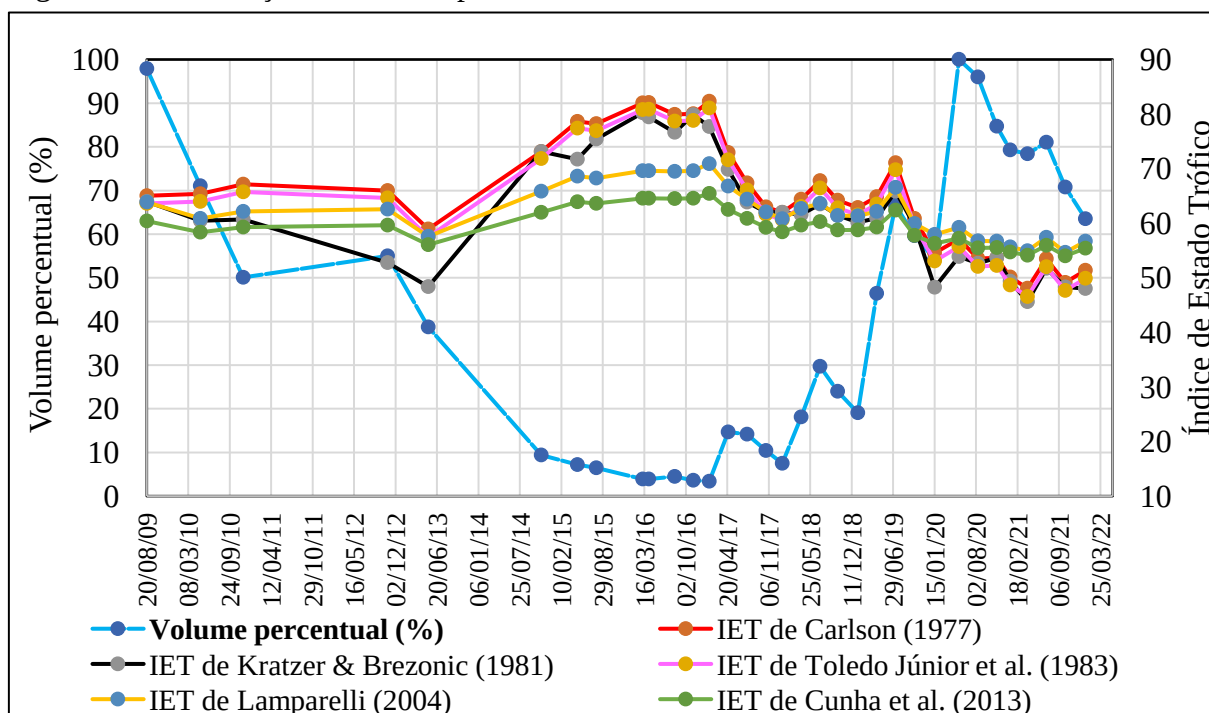
Esses resultados estão concordando com os estudos de Wiegand *et al* (2016, 2020, 2021) que concluíram que a seca prolongada no estado do Ceará, com redução drástica do volume de água, contribuiu para o aumento da concentração de nutrientes no corpo hídrico. A concentração da variável PT também pode se elevar em função da carga interna do sedimento e das baixas afluências ocorridas no período. A concentração da variável limnológica do NT pode ter sido oriunda de atividades (como plantio e dessedentação de animais) desenvolvidas dentro da bacia hidráulica do reservatório (BRAGA *et al.*, 2015; ROCHA; LIMA NETO, 2021).

5.4 Correlações empíricas entre o volume percentual e os IETs multimodelo

Na Figura 14 são mostradas as correlações entre a variável hidroclimática e o volume percentual do reservatório Araras associadas aos valores dos IETs multimodelo do monitoramento da qualidade da água do reservatório Araras durante o período de 2009 a 2022, feitas a partir dos diferentes níveis da água que o reservatório atingiu ao longo desse período de monitoramento refletindo distintas condições tróficas devido à oscilação do volume percentual.

Essa oscilação do nível da água no reservatório de volumes percentuais baixíssimos à capacidade máxima de armazenamento com reflexos diretos na qualidade da água são apontados pelos comportamentos de todos os modelos que compõem esta abordagem multimodelo em seus resultados, no geral, são inversamente proporcionais aos valores dos volumes percentuais indicando assim direta ou indiretamente as concentrações que os causam.

Figura 14 – Correlação do volume percentual e os IETs multimodelo do reservatório Araras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 14 se observa o quanto essas variáveis estão fortemente relacionadas, nos primeiros e últimos anos de avaliação, com o volume percentual acima de 50%, correspondem aos menores valores dos IETs, enquanto que para o restante do período, com volume percentual do reservatório inferior a 50%, os IETs apresentam os seus valores mais elevados, então enquanto mais o volume de água diminui no reservatório mais se intensifica a condição trófica.

De 2009 a 2013 os resultados dos IETs calculados pelos modelos de Lamparelli (2004) e Cunha *et al.* (2013) apresentaram menores disparidades tanto entre si quanto em comparação aos demais modelos, e à medida que o volume percentual vai diminuindo essas divergências vão aumentando tanto entre esses dois modelos quanto entre eles em relação aos demais, com as maiores divergências no período de 2014 a 2017 com o volume percentual médio de 5,3%, e que essas divergências voltam a diminuir à medida que o volume percentual vai aumentando.

Os IETs gerados pelos modelos de Carlson (1977); Krazter & Brezonic (1981); e Toledo Júnior *et al.* (1983) seguem um comportamento de tendência trófica, em geral, consideravelmente próximos. E que os resultados obtidos pelos modelos de Lamparelli (2004; e Cunha *et al.* (2013) seguem comportamento de tendência trófica similar entre si com tendência mais conservadora em relação aos outros modelos, exceto no período de 2020 a 2022.

Constata-se, portanto, a partir da Figura 14, que os resultados dos IETs multamodelo apresentaram comportamentos tróficos com os valores que evidenciam as divergências entre os

modelos seguindo predominantemente a mesma tendência à medida que os volumes percentuais aumentam, ou diminuem, no reservatório Araras no período de agosto de 2009 a janeiro 2022.

A variável hidroclimática volume percentual afetou determinantemente os resultados multimodelos dos IETs, apresentado os resultados com valores mais elevados quando o volume estava baixo, e apresentando valores mais baixos quando o volume do reservatório estava alto.

Estes resultados estão em desacordo com os de Cunha *et al.* (2021) que realizaram estudo para reservatórios da região sudeste que compararam o modelo de Lamparelli (2004) com o modelo de Carlson (1977), e o modelo de Carlson (1977) mostrou-se mais conservador.

Esses resultados estão corroborando com os resultados encontrados por Beghelli *et al.* (2016), que em seus estudos usaram a classificação do estado trófico descrita por Cunha *et al.* (2013), então eles verificaram a ocorrência do processo de eutrofização ao longo dos anos do monitoramento, com os valores mais altos de PT registrados no período mais seco do período.

Estes resultados estão corroborando com os de Santos *et al.* (2017) que utilizaram o IET desenvolvido por Cunha *et al.* (2013) para estimar o estado trófico do reservatório Castanhão, de 2011 a 2014, e demonstraram que à medida que a seca se prolongava se intensificava o processo de eutrofização no reservatório e confirmaram que a estratificação na coluna d'água existia durante os períodos de maior volume, mas que se interrompia à medida que o volume do reservatório diminuía alterando assim a sua dinâmica trófica no reservatório.

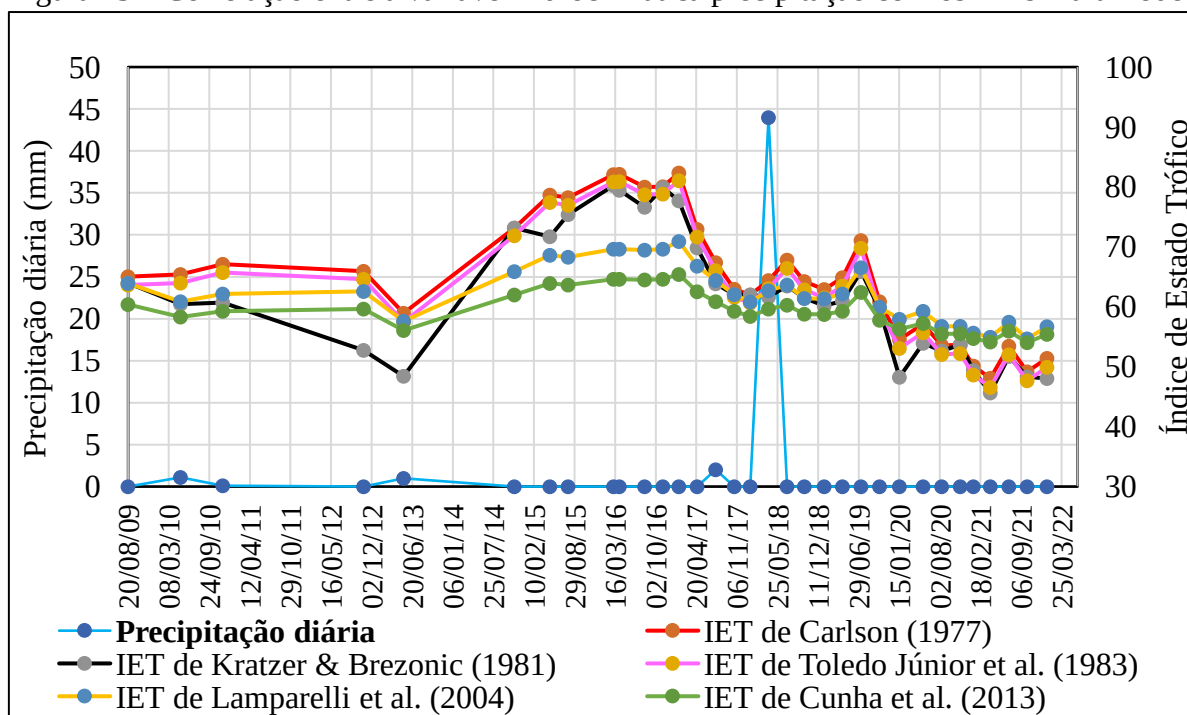
Estes resultados estão de acordo com os estudos de Batista *et al.* (2014), que utilizarem o IET de Toledo Júnior *et al.* (1983) para classificação do estado trófico do segundo maior reservatório do Ceará (Orós) e concluíram que o grau de trofia durante o período de estiagem no corpo d'água era mais intenso decorrente da redução do volume armazenado no reservatório.

Estes resultados apresentam também concordância com o estudo de Chaves *et al.* (2013), que observaram que o estado trófico está relacionado com as flutuações sazonais na hidrologia do sistema controlado pela chuva, que é característica comum de regiões semiáridas.

5.5 Correlações empíricas entre a precipitação diária e os IETs multimodelo

A Figura 15 exibe as correlações entre a precipitações diárias associadas aos valores dos IETs multimodelo para o reservatório Araras de agosto de agosto de 2009 até janeiro de 2022.

Figura 15 – Correlação entre a variável hidroclimática precipitação com os IETs multimodelo.



Conforme a Figura 15 pode ser observado que não houve influência significativa da pluviometria diária sobre os valores dos IETs multimodelos, portanto os resultados não identificaram influência considerável da precipitação diária sobre as condições tróficas do reservatório Araras no que diz respeito às concentrações dos parâmetros de qualidade da água.

Como defendem muitos autores, o escoamento superficial, principalmente em virtude das características e uso do solo em regiões semiáridas em que predomina a vegetação da Caatinga, notadamente com as primeiras chuvas torrenciais da quadra chuvosa, teria considerável influência em razão do material alóctone que adentra no reservatório causando mudança na concentração e afetando as variáveis limnológicas que caracterizam a eutrofização.

Poderia até salientar que a maior precipitação média diária que ocorreu de 44mm tenha tido alguma influência sobre o aumento das concentrações das variáveis limnológicas e consequentemente contribuído para os valores dos IETs mais elevados na campanha de 11 de abril de 2018, mas poderia ser inconsistente por falta de condição comparativa, uma vez que as demais precipitações médias diárias foram bastante insignificativas para as demais campanhas.

Esta constatação corrobora com a encontrada por Noranha (2022), que realizou uma análise temporal de IET no reservatório General Sampaio, inserido no semiárido cearense, entre 2009 e 2019, e concluiu que a pluviometria média irregular, de maneira geral, afeta o processo de eutrofização, entretanto as chuvas decorrentes de até 10 dias antes dos dados serem coletados não demonstraram correlações significativas com as concentrações das variáveis limnológicas.

5.6 Determinação do nutriente limitante para o reservatório Araras

A Tabela 11 mostra os resultados do nutriente limitante determinados por meio do modelo de Carlson (1991), modelo de Kratzer & Brezonic (1981) e pela razão de Redfield (1958) do reservatório Araras, considerando o período entre agosto de 2009 a janeiro de 2022.

A coincidência desses três modelos quanto ao Nitrogênio e Fósforo como nutriente limitante, foi constatada em cinco campanhas de monitoramento: nov. de 2012 e maio de 2013, Nitrogênio. Nov. de 2014; jan. de 2018 e nov. de 2020, Fósforo, segundo exibido na Tabela 11.

Tabela 11 – A determinação do Nutriente Limitante da eutrofização para o reservatório Araras

Data	Redfield (1958)	Carlson (1991)	Kratzer & Brezonic (1981)
20/08/2009	Fósforo	Outro fator	Nitrogênio
05/05/2010	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
29/11/2010	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
24/10/2012	Nitrogênio	Nitrogênio	Nitrogênio
08/05/2013	Nitrogênio	Nitrogênio	Nitrogênio
05/11/2014	Fósforo	Fósforo	Fósforo
29/04/2015	Nitrogênio	Fósforo	Nitrogênio
28/07/2015	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
08/03/2016	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
06/04/2016	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
09/08/2016	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
07/11/2016	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
24/01/2017	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
24/04/2017	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
24/07/2017	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
24/10/2017	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
11/01/2018	Fósforo	Fósforo	Fósforo
11/04/2018	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
12/07/2018	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
04/10/2018	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
10/01/2019	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
11/04/2019	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
11/07/2019	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
10/10/2019	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
16/01/2020	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
12/05/2020	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
11/08/2020	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
10/11/2020	Fósforo	Fósforo	Fósforo
14/01/2021	Fósforo	Fósforo	Nitrogênio
08/04/2021	Fósforo	Outro fator	Nitrogênio
08/07/2021	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
06/10/2021	Fósforo	Nitrogênio	Nitrogênio
12/01/2022	Fósforo	Outro fator	Nitrogênio

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo de Carlson (1991) apontou majoritariamente o Nitrogênio como principal fator responsável pela eutrofização, em cerca de 52% do período avaliado, e o mesmo sugere que o Fósforo é o fator responsável pela eutrofização em 39% do período investigado; também apontou que em 9% do período que a eutrofização do reservatório está relacionada a outro fator.

Pela razão de Redfield (1958), a causa preponderante da condição de eutrofização do reservatório foi o Fósforo, representando 91% das datas investigadas, enquanto que em 9% das datas analisadas a razão apontou o Nitrogênio como o nutriente limitante da condição eutrófica.

Quanto ao modelo de Kratzer & Brezonice (1981), a causa majoritária da eutrofização do reservatório foi o Nitrogênio, representado por 91% do tempo investigado, enquanto que em apenas 9% do tempo avaliado esse modelo pode indicar que o nutriente limitante foi o Fósforo.

Estes resultados estão corroborando com os de Wiegand *et al.* (2020), que avaliaram o nutriente limitante da produção algal em reservatórios do semiárido brasileiro, de 2018 a 2017, e constataram que a razão de Redfield (1958), com 68% (PT) e 32% (NT) apontou como nutriente limitante, enquanto que o modelo de Kratzer & Brezonice (1981) foi de 61% para o NT e 39% para o PT, já o modelo de Carlson (1991) indicou que o NT é o fator preponderante, mas o PT, e outro fator (turbidez abiótica; herbivoria), foram indicados limitantes relevantes.

Quanto ao Fósforo ser o nutriente limitante pela razão de Redfield (1958) em 95% e pelo modelo de Carlson (1991) em 39%, está corroborando com os resultados de Paulino *et al.* (2013), que em seu estudo realizado entre 2008 a 2011 em diversos reservatórios monitorados pela COGERH, constaram o PT como o nutriente limitante em 65% dos resultados encontrados.

Estes resultados encontrados também estão corroborando com os resultados de Rocha Júnior *et al.* (2018) que indicaram o PT como nutriente limitante da produção da biomassa fitoplanctônica em alguns reservatórios de regiões semiáridas tropical, no Rio Grande do Norte.

Estes resultados também estão concordando com Rolim *et al.* (2019), que ao determinarem o nutriente limitante em 18 reservatórios do semiárido cearense, constataram pela razão de Redfield, que o nutriente limitante foi o Fósforo para 16 reservatórios, 2 reservatórios apresentaram como nutriente limitante o Nitrogênio. Esses autores destacaram que em regiões semiáridas a temperatura elevada acelera o metabolismo aquático e qualquer nutriente em excesso pode ser um agente para potencializar o processo trófico em reservatórios semiáridos.

Os resultados deste trabalho também estão de acordo com o apresentado por Liang *et al.* (2020), que avaliando as condições tróficas de 1382 lagos, afirmam que o PT e NT controlam o estado trófico de reservatórios, indicando que a biomassa algal é limitada por esses nutrientes.

Nos resultados dos três modelos é observado certa divergência entre eles quanto à indicação de qual fator ou nutriente está influenciando mais, com coincidência do nutriente limitante em cinco datas, em três delas coincide o PT e em duas há coincidência com o NT, portanto divergindo nas demais datas das campanhas do monitoramento do reservatório Araras.

Maberly *et al.* (2020) relataram que os lagos onde a relação Chl-*a* com PT é mais alta, são potencialmente limitados por P porque a conversão do PT para Chl-*a* é eficiente e constataram, baseado nessas proporções, que dos 17 lagos avaliados em seus estudos, 5 foram limitados por P, 1 limitado por N, 10 indicaram colimitação; e 1 não foi limitado por nutriente.

Em resultados encontrados por Tundisi e Tundisi (2008) afirmam que a individualidade dos reservatórios é muito característica, portanto, em alguns casos, o Nitrogênio e/ou Fósforo, eles podem ser os nutrientes limitantes na produção do fitoplâncton dos ecossistemas aquáticos.

O que diferencia os modelos é em geral a sua estrutura e condições de construção, portanto guardam características peculiares que os distinguem, inclusive esses modelos são originalmente de regiões temperadas, portanto sua predominância em estudo comparativo assume diversas nuances contornadas pelo entendimento do modelo que melhor represente as condições tróficas percebidas de reservatório do semiárido tropical brasileiro sob peculiaridade.

Como há estudos que apontam o Fósforo, outros apontam o Nitrogênio e outros estudos apontam outro fator como limitante, então todos os modelos utilizados são equiprováveis, dessa maneira não se pode considerar que haja alguma inconsistência entre os modelos, porque existem muitos aspectos correlacionados que confluem para o fenômeno da eutrofização nas condições semiáridas e que em muitas situações um pode se sobrepor ao outro temporariamente.

A coincidência entre os modelos para o Nitrogênio ou para o Fósforo assim como a divergência evidenciam que diversos fatores podem influenciar o processo da eutrofização, e que em alguma circunstância, um prevalece sobre o outro, mas todos podem influenciar no processo da eutrofização, de maneira que a caracterização da eutrofização determina o melhor entendimento de como a dinâmica do reservatório está sendo mais intensamente influenciada.

O modelo mais recente, entre os três utilizados, e com características estruturais mais abrangentes seja o que melhor abarque as características e dinâmicas das condições tróficas dos reservatórios do semiárido, portanto, nessa perspectiva o modelo proposto por Carlson (1991) pode ser o predominante e se diferencia dos demais pela consistência com que aponta o Nitrogênio, o Fósforo, e outro fator, como determinante da eutrofização no reservatório Araras.

Com preponderância de Carlson (1991) e majoritariamente por Krazter & Brezonic (1981) em considerar o NT como o nutriente limitante, entretanto a relevância com que foi apontada o PT como o nutriente limitante tanto pelo primeiro modelo como indicado

majoritariamente por Redifield (1958), bem como a influência de outro fator, conclusão semelhante encontrada por Wiegand *et al.* (2020), então deve-se considerar ambos os nutrientes, notadamente o NT, e outro fator, como determinantes da eutrofização no reservatório Araras; e em peso majoritário, com ressalvas, considera-se o NT como o limitante.

5.7 Classificação trófica da avaliação multimodelo IET para o reservatório Araras

Na Tabela 12 são exibidos os resultados dos IETs para o reservatório Araras calculados e classificados de acordo com a classe e faixa tróficas, conforme a metodologia multimodelo IET, compreendendo o período entre agosto de 2009 a janeiro de 2022. É mostrado também a classificação trófica realizada pela COGERH sobre o reservatório Araras deste mesmo período.

Nas campanhas de 24 de outubro/2012 e 08 de maio/2013, em que os três modelos coincidiram em apontar o Nitrogênio como o nutriente limitante, então para essas campanhas, para a determinação do IET, foi utilizado somente o modelo desenvolvido por Kratzer & Brezonic (1981), único modelo que considera o Nitrogênio na determinação de IET, desconsiderando-se nessas duas datas os demais modelos que utilizam o Fósforo (Tabela 12).

Tabela 12 – A classificação trófica pela avaliação multimodelo IET para o reservatório Araras (Continua)

Data	Carlson (1977)	Kratzer & Brezonic (1981)	Toledo Jr <i>et al.</i> (1983)	Lamparelli (2004)	Cunha <i>et al.</i> (2013)	Cogerh
20/08/2009	HE (65)	HE (64)	E (64)	SE (64)	HE (60)	E
05/05/2010	HE (65)	HE (60)	E (64)	E (61)	SE (58)	E
29/11/2010	HE (67)	HE (61)	E (66)	E (62)	HE (59)	E
24/10/2012	-	E (53)	-	-	-	O
08/05/2013	-	M (48)	-	-	-	E
05/11/2014	HE (73)	HE (73)	E (72)	S (66)	HE (62)	H
29/04/2015	HE (79)	HE (72)	HE (77)	HE (69)	HE (64)	HE
28/07/2015	HE (78)	HE (75)	HE (77)	HE (68)	HE (64)	HE
08/03/2016	HE (82)	HE (80)	HE (81)	HE (70)	HE (65)	HE
06/04/2016	HE (82)	HE (79)	HE (81)	HE (70)	HE (65)	HE
09/08/2016	HE (80)	HE (77)	HE (79)	HE (69)	HE (64)	HE
07/11/2016	HE (80)	HE (80)	HE (79)	HE (70)	HE (65)	HE
24/01/2017	HE (82)	HE (78)	HE (81)	HE (71)	HE (65)	HE
24/04/2017	HE (73)	HE (70)	E (72)	HE (67)	HE (63)	E
24/07/2017	HE (67)	HE (64)	E (66)	SE (64)	HE (61)	E
24/10/2017	HE (63)	HE (62)	E (62)	E (62)	HE (59)	E
11/01/2018	HE (62)	HE (62)	E (61)	E (61)	SE (58)	E
11/04/2018	HE (64)	HE (62)	E (63)	S (63)	HE (60)	E
12/07/2018	HE (68)	HE (63)	E (66)	S (64)	HE (60)	E
04/10/2018	HE (64)	HE (61)	E (63)	E (61)	HE (59)	E
10/01/2019	HE (63)	HE (60)	E (62)	E (61)	HE (59)	E

Tabela 12 – A classificação trófica pela avaliação multimodelo IET para o reservatório Araras (Conclusão)

Data	Carlson (1977)	Kratzer & Brezonic (1981)	Toledo Jr et al. (1983)	Lamparelli (2004)	Cunha et al. (2013)	Cogerh
11/04/2019	HE (64)	HE (61)	E (63)	E (62)	HE (59)	E
11/07/2019	HE (71)	HE (66)	E (70)	HE (67)	HE (62)	E
10/10/2019	HE (61)	HE (60)	E (59)	E (60)	E (58)	E
16/01/2020	E (55)	E (48)	M (53)	M (58)	E (56)	E
12/05/2020	E (57)	E (54)	E (56)	E (59)	E (57)	E
11/08/2020	E (54)	E (53)	M (52)	M (57)	M (55)	E
10/11/2020	E (54)	E (54)	M (52)	M (57)	E (56)	E
14/01/2021	E (50)	M (49)	M (49)	M (56)	M (55)	M
08/04/2021	M (48)	M (46)	M (47)	M (55)	M (54)	E
08/07/2021	E (53)	E (52)	M (52)	M (57)	E 56)	E
06/10/2021	M (49)	M (48)	M (48)	M (55)	M (54)	E
12/01/2022	E (51)	M (48)	M (51)	M (57)	M (55)	M

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: O = Oligotrófico; M = Mesotrófico; E = Eutrófico; SE = Supereutrófico; HE = Hipereutrófico.

A partir do modelo de Carlson (1977), e suas as adaptações constituindo os demais quatro modelos, esta avaliação multimodelos IET se apoiou para realizar a classificação trófica do reservatório Araras, ressaltando inicialmente que Carlson (1977) e Krazter & Brezonic (1981) consideram quatro níveis tróficos; Toledo Júnior *et al.* (1990) consideram cinco níveis; Lamparelli (2004) e Cunha *et al.* (2013) consideram os 6 níveis, em seus respectivos modelos.

As classes Oligotrófica, Mesotrófica, Eutrófica e Hipereutrófica são comuns a todos os cinco modelos, as classes Ultraoligotrófica são comuns aos três modelos nacionais, e a classe Supereutrófica é comum apenas aos modelos de Lamparelli (2004) e ao de Cunha *et al.* (2013).

O range da faixa trófica apresentado pelos modelos entre o menor e o maior valor se diferencia estruturalmente a ponto de a mesma condição de trofia oscilar em graus tróficos distintos, ressalta-se então que cada modelo tem sua faixa distinta, exceto os dois modelos internacionais que utilizam a mesma indicação trófica, o modelo de Toledo Júnior *et al.* (1990) de faixa 24 a 74; Lamparelli (2004) de faixa 47 a 67; Cunha *et al.* (2013) com faixa 51,1 a 59,1.

Os limiares estabelecidos pelos modelos para cada faixa de classificação trófica assumem as principais razões que promovem estruturalmente as diferenças entre os modelos quanto a estabelecer a mais adequada caracterização do estado trófico, isso faz com que um menor valor de IET esteja para uma maior classificação trófica, enquanto que um maior valor de IET enquadre-se em menor classificação trófica, a depender do modelo que se opte a utilizar.

Analisando o modelo de Cunha *et al.* (2013) ao modelo de Carlson (1977), exibidos na Tabela 12, em que IET = 55 no modelo de Cunha (2013) se classifica como mesotrófico, enquanto que o IET = 52 no modelo de Carlson (1977) classifica-se como eutrófico, portanto

um menor valor de IET está em pior classe trófica, então as diferenças entre os modelos provocam disparidade acentuada de classificação trófica entre os modelos ao classificarem a mesma realidade trófica, e não são modelos específicos para condições do semiárido tropical.

Então pela avaliação multimodelo ao integrar os cinco modelos de IET com faixas mais amplas e menos amplas e com seus distintos valores, bem como os diferentes intervalos entre elas, cria-se então uma única faixa integrativa ampla do modelo de menor valor de IET ao modelo de maior valor do IET, assim com essa faixa de integração dos modelos possibilita uma avaliação do estado trófico mais consistente e atuação para tomada de decisão mais precisa.

A avaliação multimodelo IET (Tabela 12) identificou que a situação hídrica mais crítica foi na campanha de março/2016 com valores de ITEs na faixa de 65 a 82; e a campanha que apresentou melhor situação hídrica foi a de abril/2021 com valores de IETs na faixa de 46 a 55; portanto a faixa trófica de amplitude global incluindo todas as campanhas de monitoramento de 2009 a 2022 apresentou valores de IET de 46 a 82, classificando o estado trófico do reservatório de mesotrófico a hipereutrófico; com volume percentual máximo de 100% e volume mínimo de 3,60% que o reservatório Araras atingiu durante o período de 2009 a 2022.

Da abordagem multimodelo IET que resultou numa classificação de estado trófico com as divergências entre os cinco modelos de IET, como sendo todos equiprováveis, e foram exatamente essas divergências que serviram de base para a construção da metodologia multimodelo, e considerando a classificação trófica feita pela COGERH para o reservatório Araras, então compará-las torna-se pertinente em razão desse parâmetro formal já estabelecido.

Os modelos de Carlson (1977), Kratzer & Brezonic (1981), Toledo Júnior *et al.* (1983), Lamparelli (2004) e Cunha *et al.* (2013) indicaram um estado trófico coincidente com a classificação trófica realizada pela COGERH para o reservatório Araras em 42%, 48%, 77%, 58% e 48%, respectivamente, considerando todo o período de avaliação com a disponibilidade.

O modelo de IET que mais coincidiu com a classificação do estado trófico realizado pela COGERH foi o modelo de Toledo Júnior *et al.* (1983), com uma coincidência de 77% dos resultados encontrados, enquanto que o modelo de Carlson (1977) foi o que menos coincidiu com a metodologia da mesma (42%) estabelecendo, portanto uma diferença percentual de 23%.

Este resultado está corroborado com o estudo de Paulino *et al.* (2013), que ao incluir o modelo de Toledo Júnior *et al.* (1983) em sua metodologia trófica classificatória, a COGERH inclui outros componentes técnicos para compor sua classificação trófica dos corpos hídricos.

Esta constatação está corroborando com Klippel *et al.* (2020) realizaram um estudo comparativo entre diferentes IETs (Carlson (1997), Toledo Júnior *et al.* (1983), Lamparelli (1983) e Cunha *et al.* (2013)) e comprovaram que o modelo de Toledo Júnior *et al.* (1983) foi

o modelo que mais se mostrou coerente com as condições tróficas dos reservatórios avaliados.

Nesta avaliação multimodelo IET cerca de 93,5% do período avaliado pelo menos um dos modelos coincidiu com o estado trófico indicado pela COGERH, no entanto com os 6,5% do período que não coincidiu com a Companhia de Gestão, todos os cinco modelos nesse período coincidiram entre si, portanto sugerindo grande utilidade dessa metodologia proposta.

Do início do ano de 2015 ao início do ano de 2017, a classificação hipereutrófica do açude Araras coincide para todos os cinco modelos utilizados, porém se mostram mais rigorosos quanto à classificação feita pela COGERH para o reservatório, mesmo tendo coincido em parte.

Estes resultados estão corroborando com Rosendo (2022), que realizou estudo sobre PT em reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Acaraú-CE, considerando o período 2016 a 2021, utilizando o IET de Lamparelli (2004) verificou que o açude Araras foi classificado como hipereutrófico em pelo menos cinco semestre seguidos, de 2016.1 a 2018.1, e apresentou uma melhoria em relação ao seu grau de eutrofização após doze semestres de realização das análises.

Como a partir deste método multimodelo IET fica estabelecido que a condição de eutrofização corresponde à classe Eutrófica e suas subseqüentes, por outra lado fica estabelecido que a condição de não-eutrofização corresponde à classe Mesotrófica e suas precedentes, então pode constatar que o método multimodelo convergiu na indicação da possibilidade de eutrofização (estado trófico a partir do nível eutrófico) do ano de 2009 a 2019.

De 2020 a de 2022, os modelos apresentaram divergências relevantes entre si, pois enquanto alguns modelos indicaram eutrofização do corpo hídrico (classe eutrófica), outros apontaram não-eutrofização (classe mesotrófica), conforme a respectiva faixa de critérios de classificação que cada modelo utilizou para enquadrar o corpo d'água quanto ao grau de trofia, isso pode constatar que as divergências se acentuaram quando na condição de não-eutrofização.

Isso estabelece um ponto fundamental dessa abordagem porque em situações tróficas amenas os modelos apresentam padrão bem diferentes de quando o reservatório estava em situação trófica crítica, pois os valores em termos gerais diminuíram, mas mantiveram a divergência classificatória do estado trófico apontando predomínio a condição de não-eutrófica.

Ressalta-se que aproximadamente 93% do período de 2009 a 2022, pelo menos um dos cinco modelos de IET coincidiu com a classificação trófica da COGERH, isso demonstra que a metodologia multimodelo IET é de grande importância, pois utiliza uma faixa trófica classificatória com amplitude capaz de abranger satisfatoriamente outras metodologias usadas.

A avaliação multimodelo IET demonstra ser, portanto, uma relevante ferramenta metodológica de caracterização trófica, fornecendo um conjunto de informações confiáveis para subsidiar o adequado monitoramento e planejamento da qualidade da água dos

reservatórios do semiárido cearense, assim mostra ser uma aliada consistente para contribuir com as soluções dos problemas relacionados com a eutrofização da região semiárida brasileira.

Na Tabela 13 está exibido a classificação trófica do reservatório Araras pela avaliação multimodelo IET de 2009 a 2022 fragmentado em quatro períodos com distintos valores de volumes percentuais de diferentes situações hídricas, com média 62% de 2009 a 2013; 05% de 2014 a 2017; 28% de 2017 a 2019; e 79% de 2020 a 2022, para que possa considerar que nos 14 anos de monitoramento houve distintas situações de aportes hídricos no reservatório Araras.

Tabela 13 – Classificação por aporte hídrico da avaliação multimodelo do reservatório Araras

Período	2009 a 2013		2014 a 2017		2017 a 2019		2020 a 2022	
Volume	62%		5%		28%		79%	
Modelo	IET	Classe	IET	Classe	IET	Classe	IET	Classe
Calson (1977)	66	HE	80	HE	66	HE	52	M
Krazter e Brezonic (1981)	57	E	77	HE	63	HE	50	M
Toledo Jr. (1983)	65	E	78	HE	64	E	51	M
Lamparelli (2004)	62	E	69	HE	63	E	57	E
Cunha <i>et al.</i> (2013)	59	SE	64	HE	60	HE	55	E

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: O = Oligotrófico; M = Mesotrófico; E = Eutrófico; SE = Supereutrófico; HE = Hipereutrófico.

Na Tabela 13, em face da evidência os resultados foram comprimidos em valores médios por período sem perda significativa em razão da certa uniformidade dos dados e por melhor representar quatro realidades hídricas diferentes, então de 2009 a 2013, quando o reservatório estava, em média, com 62% do seu volume, a avaliação multimodelo gerou a faixa de IET de 57 a 66, classificando assim o estado trófico do reservatório na classe eutrófica a hipereutrófica.

Esses resultados estão corroborando com os de Araújo *et al.* (2018), que realizaram um estudo com os IETs de Carlson (1977), Lamparelli (2004) e Cunha *et al.* (2013) em dois reservatórios no Espírito Santo, de 2008 a 2014, e concluíram que as classes resultantes podem ser muito diferentes, mesmo a partir de valores de parâmetros registrados em um mesmo ponto e em uma mesma campanha, e que em alguns casos, as classes escolhidas pelos diferentes modelos variaram, para o mesmo ponto e em uma mesma campanha, entre oligotrófico e hipereutrófico, portanto recebendo classificação trófica diferente para mesma realidade trófica.

Do período de 2014 a 2017, quando o volume do reservatório estava em média com 5% de sua capacidade de armazenamento, a avaliação multimodelo gerou uma faixa de IET que variou de 64 a 80, e assim classificou o estado trófico do reservatório na classe hipereutrófica.

Quanto ao período de abril de 2017 a outubro de 2019, quando o reservatório estava com 28% de sua capacidade de acumulação de água, a avaliação multimodelo gerou uma faixa de IET de 60 a 66, que classificou o estado trófico do reservatório Araras da classe eutrófica à classe hipereutrófica, considerando assim que a faixa trófica abrange classes distintas provocadas devido às sabidas divergências dos modelos que geram valores menores e maiores.

Já no período de janeiro/2020 a janeiro/2022, quando o volume do reservatório estava em média com 79% de sua capacidade máxima, a avaliação multimodelo gerou a faixa de IET de 50 a 57, que classificou o estado trófico do reservatório Araras abrangendo da classe mesotrófica à eutrófica com predominância mesotrófica, logo em condição de não-eutrofização.

O reservatório Araras do período de agosto de 2009 a janeiro de 2022, pelos quatros períodos de diferentes situações de aporte hídrico, a avaliação multimodelo gerou a faixa de intervalo trófico global de 50 a 80, com volume percentual que em média oscilou de 79% a 5%, da capacidade de acumulação de água atingido nesse espaço de tempo, segundo as distintas situações hídricas, classificando-o da classe mesotrófica até à classe hipereutrófica (Tabela 13).

Independentemente que se considere as campanhas de monitoramento individualmente, ou comprimi-las em subperíodos, ou considerá-las em sua totalidade, as faixas geradas pela avaliação multimodelo IET abrange valor do modelo mais restritivo ao modelo mais amplo, com a qual se pode tomar decisões sobre os recursos hídricos mais conservadoras, menos conservadoras ou considerando um ponto de equilíbrio entre ambos para o planejamento.

Pela avaliação multimodelo, a partir das faixas de IET geradas, a atuação dos tomadores de decisões sobre as questões dos recursos hídricos passa a ter uma perspectiva muito mais holística e representativa da realidade do estado trófico do corpo hídrico, portanto essa faixa de atuação evita que a tomada de decisão fique restrita à incerteza de modelo individual.

Como essa faixa de atuação é relativamente ampla devido às diferenças entre os modelos de IET o que pode subestimar ou superestimar os valores de classificação do estado trófico, pode-se então com a avaliação multimodelo IET encontrar a condição eutrófica ou a condição não-eutrófica do reservatório, a partir de um valor de referência calculado pelos valores limiares que delimitam mesotrófico e eutrófico dos cinco modelos tradicionais, que pela média aritmética simples encontrou-se o valor 54 (IET = 54), abaixo desse valor o corpo hídrico não estaria eutrofizado, pois até o nível mesotrófico a condição trófica do corpo hídrico não restringe com ressalvas os usos múltiplos, por não oferecer consideráveis riscos à saúde pública.

Assim se constitui o cálculo do risco de eutrofização, quando um modelo apresentar o valor do IET > 54 , a condição de eutrofização se confirma, quando o valor do IET ≤ 54 , confirma-se a condição de não-eutrofização, portanto se todos os modelos apresentarem os valores do IET menores (ou iguais) do que o valor de referência, logo o risco de eutrofização não se confirma, se todos os modelos apresentarem valores do IET maiores do que o valor de referência, então se confirma o risco total de eutrofização, se dois dos cinco modelos apresentarem valores de IET > 54 , então o risco de eutrofização será de 40% e o risco de não-eutrofização será de 60%, predominado a condição de não-eutrofização, assim se classificando.

Esse valor pontual do cálculo probabilístico do risco de eutrofização permite uma tomada de decisão mais precisa quanto à condição trófica do corpo hídrico (eutrofizado; não-eutrofizado), essas duas condições são inicialmente as mais necessárias para a gestão dos corpos hídricos, a qual citada depende de um gerenciamento preciso e de um monitoramento eficiente para se fazer um planejamento eficaz dos recursos hídricos de maneira que as tomadas de decisões sejam a mais acertadas sobre a utilização ou usos da água, e sem conflitos de interesses.

5.8 Risco de eutrofização no reservatório Araras

Então, conforme já mencionado, a partir dos resultados obtidos na avaliação multimodelo IET, foi efetuado o cálculo probabilístico do risco de eutrofização individualmente para cada campanha de monitoramento da qualidade da água do reservatório Araras compreendendo o período de agosto de 2009 a janeiro de 2022, segundo exibido na Tabela 14.

Nas duas campanhas em que houve coincidência entre os modelos quanto ao Nitrogênio ser o nutriente limitante, outubro de 2012 e maio de 2013, utilizou-se apenas o modelo de Krazter & Brezonic (1981), que é o único modelo a utilizar as concentrações de Nitrogênio para determinação do IET, observa-se então que nessas duas datas os valores do IET foram 53 e 48, como estão abaixo do valor de referência (IET = 54), então o risco de eutrofização foi de 0%.

Tabela 14 – Risco de eutrofização para o reservatório Araras

(Continua)						
Data	Carlson (1977)	Kratzer & Brezonic (1981)	Toledo Júnior <i>et al.</i> (1983)	Lamparelli (2004)	Cunha <i>et al.</i> (2013)	Risco de Eutrofização (%)
20/08/2009	65	64	64	64	60	100%
05/05/2010	65	60	64	61	58	100%
29/11/2010	67	61	66	62	59	100%
24/10/2012	-	53	-	-	-	0%

(Conclusão)

Tabela 14 – Risco de eutrofização para o reservatório Araras

Data	Carlson (1977)	Kratzer & Brezonic (1981)	Toledo Júnior et al. (1983)	Lamparelli (2004)	Cunha et al. (2013)	Risco de Eutrofização (%)
08/05/2013	-	48	-	-	-	0%
05/11/2014	73	73	72	66	62	100%
29/04/2015	79	72	77	69	64	100%
28/07/2015	78	75	77	68	64	100%
08/03/2016	82	80	81	70	65	100%
06/04/2016	82	79	81	70	65	100%
09/08/2016	80	77	79	69	64	100%
07/11/2016	80	80	79	70	65	100%
24/01/2017	82	78	81	71	65	100%
24/04/2017	73	70	72	67	63	100%
24/07/2017	67	64	66	64	61	100%
24/10/2017	63	62	62	62	59	100%
11/01/2018	62	62	61	61	58	100%
11/04/2018	64	62	63	63	60	100%
12/07/2018	68	63	66	64	60	100%
04/10/2018	64	61	63	61	59	100%
10/01/2019	63	60	62	61	59	100%
11/04/2019	65	61	63	62	59	100%
11/07/2019	71	66	70	67	62	100%
10/10/2019	61	60	59	60	58	100%
16/01/2020	55	48	53	58	56	60%
12/05/2020	57	54	56	59	57	80%
11/08/2020	54	53	52	57	55	40%
10/11/2020	54	54	52	57	56	40%
14/01/2021	50	49	49	56	55	40%
08/04/2021	48	46	47	55	54	20%
08/07/2021	53	52	52	57	56	40%
06/10/2021	49	48	48	55	54	20%
12/01/2022	51	48	50	57	55	40%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Tabela 14, exceto nas duas datas mencionadas, que de agosto de 2009 a outubro de 2019 todos os modelos apresentam valores de IETs maiores do que o valor do IET de referência (IET = 54), portanto se confirma o risco total de eutrofização para o reservatório Araras durante os primeiros dez anos de monitoramento que este estudo concentrou em analisar.

De janeiro de 2020 a janeiro de 2022, pela Tabela 14, constata-se que em nenhuma campanha nesse biênio o risco de eutrofização atingiu 100%, inclusive na campanha de maio de 2020 apenas um modelo apresentou um valor de IET igual a 54, como foi igual ao valor de referência, então se considera o risco de 20% para a não-eutrofização, portanto os outros quatro modelos de IET juntos apontaram um risco de eutrofização de 80% para o reservatório Araras.

Ainda sobre período de dois últimos anos de monitoramento que este estudo considerou, apresenta 01 campanha de monitoramento que o risco de eutrofização foi de 60%, 05 campanhas que o risco de eutrofização foi de 40% e 02 campanhas que o risco de eutrofização foi de 20%, conforme se pode observar na Tabela 14, esses menores riscos percentuais de eutrofização 40 % e 20% aconteceram a partir da campanha de monitoramento de ago. de 2020.

Observa-se, pela Tabela 14, outro padrão interessante, de abril de 2017 a outubro de 2019, que apesar do risco de eutrofização se confirmar em 100%, portanto todos os modelos apresentam resultados de $IET > 54$, porém tais valores apresentam-se numa decrescente, ocupando uma posição intermediária que refletem a situação de aporte hídrico mais crítico e a situação de aporte hídrico menos crítico, confirmando que o reservatório Araras vinha, entre os anos de 2017 a 2019, estava numa recuperação hídrica em razão das secas dos anos precedentes.

Verifica-se a partir dessas observações que os resultados do cálculo do risco de eutrofização seguindo a mesma tendência dos resultados da avaliação multimodelo IET, apontaram risco menores de eutrofização para o final do período e risco total de eutrofização nos primeiros dez anos de monitoramento, apresentando resultados que refletem as condições tróficas do reservatório do período de 2009 a 2022 confirmando coerência a avaliação multimodelo, que apontam para o último biênio predominância mesotrófica (condição de não-eutrofização, $IET \leq 54$) e no restante do período a prevalência das classes hipereutrófica, supereutrófica ou a eutrófica (condição de eutrofização, $IET > 54$) para o reservatório Araras.

No geral, enquanto maiores os volumes percentuais apresentados ao longo de 2009 a 2022 pelo reservatório Araras, menores foram os riscos de eutrofização no reservatório, quando o reservatório permaneceu por período mais longo com maiores volumes percentuais, os riscos de eutrofização diminuíram de 100% para 20%, já durante o maior período que o reservatório fica com os volumes percentuais mais baixos, os riscos de eutrofização permanecem de 100%.

De agosto de 2009 a maio de 2013, período que o reservatório se manteve com volume percentual médio de 62%, os modelos apresentaram valores médios dos IETs variando de 57 a 66, implicando na classificação eutrófica por três modelos e na classificação hipereutrófica por dois modelos, como todos os valores multimodelo ficaram acima do valor referência, então o risco que de o reservatório realmente estar na condição de eutrofização se confirma em 100%.

De novembro de 2014 a janeiro de 2017, período mais crítico do reservatório, em que o volume percentual médio do reservatório foi de 5,3%, os modelos apresentaram valores médios dos IETs variando 64 a 80, é o período que os IETs apresentaram os piores resultados, com classificação hipereutrófica por todos os modelos, e os valores dos IETs muito acima do valor do IET de referência, portanto com risco de 100% de estar em sua pior condição de eutrofização.

De abril de 2017 a outubro de 2019, com um volume percentual médio de 28%, os valores médios dos IETs variaram de 60 a 66, que a classificação se enquadra na faixa eutrófica de acordo com dois modelos e hipereutrófica conforme três modelos, apesar da diminuição dos valores dos IETs, mas estão ultrapassando o IET de referência (IET = 54), então a condição de eutrofização se confirma pelo risco de 100% de o reservatório ainda está realmente eutrofizado.

De janeiro de 2020 a janeiro de 2022, com volume percentual médio de 79%, com os valores de IETs variando de 50 a 57, três dos modelos apresentaram valores de IETs abaixo ou igual a 54, e dois modelos acima de 54, classificando-o majoritariamente na classe mesotrófica, confirmando assim a predominante da condição de não-eutrofização do reservatório Araras de 2020 a 2022, com o risco de 40% para a eutrofização, e o risco de 60% para a não-eutrofização.

Os modelos de Carlson (1977), Kratzer & Brezonic (1981) e Toledo Júnior *et al.* (1983) foram os modelos responsáveis por constatar a redução de 60% do risco de eutrofização gerando valores de IETs de 52, 50 e 51 respectivamente, confirmando a condição predominante de não-eutrofização; e os resultados dos modelos de Lamparrelli (2004) e Cunha *et al.* (2013), com os respectivos valores de IET de 57 e 55, demonstraram que o risco de eutrofização de 40% deve servir de alerta por ser um valor relativamente alto cujo planejamento hídrico precisa ser eficaz.

A abordagem combinada entre a avaliação multimodelo IET e o cálculo do risco de eutrofização se mostrou satisfatória e de fácil aplicação para a caracterização de eutrofização de reservatório. A grande vantagem da combinação entre as duas abordagens é o fornecimento de um valor pontual (risco probabilístico de eutrofização) a partir de um conjunto de resultados de IET (multimodelo IET). Considerando que cada valor de IET fornecido por cada um dos modelos pode ser tomado como verdade por ser equiprovável entre si (KLIPPEL *et al.*, 2020).

O valor pontual do risco de eutrofização facilita a gestão da qualidade da água dos reservatórios principalmente para o planejamento das ações. Visto que o tomador de decisão trabalha considerando uma informação específica (CHANG *et al.*, 2015). Cabe ressaltar que esta informação é mais confiável do que o estado trófico fornecido por um tipo particular de modelo IET (CARNEIRO *et al.*, 2022). A abordagem combinada se constitui em um importante progresso com relação aos usos isolados de um ou outro modelo de IET (KLIPPEL *et al.*, 2020).

5.9 Caracterização trófica do reservatório Araras pela Avaliação Multimodelo IET

Ao integrar o Cálculo de Risco de Eutrofização (CRE) para dar maior consistência à Avaliação Multimodelo IET, com o valor de referência encontrado mediante essa avaliação multimodelo e com as duas condições tróficas propostas, (condição de eutrofização e condição

de não-eutrofização), estabelece-se o critério da intensidade trófica, o grau com que cada uma dessas duas condições tróficas está caracterizando o reservatório quanto ao seu processo trófico.

Constatar que o corpo hídrico está ou não está eutrofizado já constitui a abordagem multimodelo IET combinada ao cálculo de risco de eutrofização como uma ferramenta metodológica de gestão hídrica muito promissora por permitir informações sintéticas a partir de um valor referencial de IET que caracteriza a condição de: eutrofização ou não-eutrofização.

No entanto, a escala de intensidade trófica propõe além de caracterizar a condição trófica a partir das informações geradas pela abordagem combinada da avaliação multimodelo e o risco de eutrofização, busca também permitir uma fácil compreensão interpretativa das condições tróficas do reservatório podendo subsidiar a gestão participativa e democrática dos recursos hídricos onde as tomadas de decisões precisam ser consistentes para evitar conflito de interesse. Na Tabela 15 está exibido a escala de intensidade de caracterização trófica proposta.

Tabela 15 – A Caracterização Trófica do Reservatório Araras pela Avaliação Multimodelo IET

Escala de Intensidade Trófica de Reservatório do Semiárido											
Condição de Não-eutrofização							Condição de Eutrofização				
Intensidade de não-eutrofização						VTR	Intensidade de eutrofização				
0	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90	99

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: VTR = Valor Trófico de Referência.

Ao combinar as metodologias obtendo a faixa trófica, as condições tróficas, o valor do risco trófico, e com a proposta da escala trófica, então é realizada a caracterização integral do estado trófico do reservatório, para tanto é a considera a escala trófica proposta na Tabela 15 que reúne a condição trófica, a intensidade trófica e o Valor Trófico de Referência que delimita as condições e o grau das intensidades tróficas que compõem a Escala de Intensidade Trófica.

Na escala a intensidade da condição de não-eutrofização compreende o intervalo de 0 a 54, enquanto que a intensidade da condição de eutrofização compreende o intervalo de 54 a 99, portanto a escala de intensidade trófica varia de 0 a 99, com o valor 54 delimitando a condição e intensidade tróficas constituindo uma visão objetiva do quão o reservatório está sendo afetado.

Ao se considerar individualmente cada valor dentre todos os resultados de IET gerados pela avaliação multimodelo nas campanhas de monitoramento do reservatório Araras de 2009 a 2022, observa-se que o menor valor de IET gerado foi 46, ao submetê-lo à análise da escala proposta, o reservatório é caracterizado na condição de não-eutrofizado, mas em situação de alerta por ocupar a intensidade 46 na escala que o valor 54 é limite da condição de eutrofização.

Enquanto que o maior valor de IET gerado dentre todos os modelos foi o $IET = 82$, analisando-o pela escala de intensidade trófica proposta, o reservatório está caracterizado como eutrofizado, com intensidade de eutrofização 82 na escala em que a partir do valor 54 a condição da eutrofização se manifesta em uma intensidade trófica em situação crítica para o reservatório.

Essa circunstância trófica pode referenciar e validar a escala proposta pela perspectiva da pior condição e intensidade trófica que corresponde ao maior valor de IET ($IET = 82$), a partir desse valor se encaminha para chegar na capacidade máxima da escala, porém o valor 82 correspondeu ao volume percentual de 3,90%, portanto é plausível afirmar que a escala proposta é capaz de medir até uma pior situação trófica com um volume percentual ainda menor.

Por outro lado, a melhor condição e intensidade trófica apresentada pelo reservatório corresponde ao menor valor do IET ($IET = 46$), isso quando o volume percentual do reservatório se aproxima de sua capacidade volumétrica máxima, inclusive com o volume de 100% atingido pelo reservatório, o valor 46 permanece ainda sendo o menor IET, então se pode confirmar a validade da escala por abarcar situação trófica com valores de IETs ainda menores que o citado.

Considerando dessa maneira que o início da escala, podendo ser do 0 ao 18, pelos padrões de qualidade e enquadramentos dos corpos d'água da região semiárida, dificilmente se encontraria IETs que se enquadrem nesse intervalo, assim se reafirma a escala proposta como referência para caracterizar o estado trófico de reservatório do semiárido por abranger os valores dos principais modelos de IETs pela integração multimodelo, por extensão pelas condições extremas apresentadas pelo reservatório Araras ao longo de anos com secas e cheias.

As médias aritméticas simples mais sucinta e igualmente representativa das condições e intensidades tróficas do reservatório durante esses quatorze anos de monitoramento que foram comprimidos em 4 períodos com diferentes volumes percentuais em que as médias das variáveis evidenciaram diferentes realidades tróficas demonstradas pela intensidade trófica, destacando-se como situação mais crítica, menos crítica e de criticidade intermediária, então assim se pode padronizar a caracterização da eutrofização por subperíodo dentro do período global analisado.

Assim os cinco modelos produziram resultados de IETs para os períodos com intensidade trófica variável, mas todas as faixas com os valores de intensidade trófica a partir de $IET = 57$ até o $IET = 80$, caracterizando o reservatório dentro das condições de eutrofização no período de 2009 a 2017. Enquanto que de 2020 a 2022 três modelos na sua respectiva faixa tiveram valores de IET com intensidade abaixo de 54, predominando a condição de não-eutrofização caracterizando o reservatório como não-eutrofizado pela maioria dos modelos.

De 2009 a 2013, com volume percentual médio de 62%, a intensidade trófica atingida correspondente aos resultados da faixa gerada na avaliação mutimodelo com os valores dos

cinco modelos dos IETs de 57; 59; 62; 65; 66 caracterizam o reservatório Araras na condição de eutrofização com intensidade trófica variando de 57 a 66 com o IET multimodelo médio de 62, localizando, portanto, na Escala de Intensidade Trófica em condição de eutrofização crítica.

De 2014 a 2017, com volume percentual médio de 5,3%, com a faixa da avaliação multimodelo com valores de IETs de 64; 69; 77; 78; 80, caracterizando o reservatório em condição de eutrofização, com intensidade trófica variável de 64 a 80, com o IET multimodelo médio de 74, identificado na Escala de Intensidade Trófica em condição de eutrofização de criticidade altíssima, enfatizando o IET individual máximo de 82 para o volume na casa de 3%.

De 2017 a 2019, com o volume percentual médio de 28%, com os resultados dos modelos dos IETs com valores de 60; 63; 63; 64; 66 da faixa dos modelos da avaliação multimodelo, com intensidade trófica oscilando de 60 a 66, com média de IET = 63, o reservatório é caracterizado em condição de eutrofização, que na Escala de Intensidade Trófica está na condição de eutrofização considerada crítica, com alertas para as devidas providências.

De 2020 a 2022, com volume percentual médio de 79%, com faixa de IET com valores de 50; 51; 52; 55; 57 da avaliação multimodelo, com resultados de três modelos com valores que caracterizam o reservatório em condição de não-eutrofização, e dois modelos com resultados que caracterizam o reservatório em condição de eutrofização, pela escala de intensidade trófica predomina a condição de não-eutrofização, com o IET multimodelo médio com o valor de 53, então a caracterização do reservatório Araras em condição de não-eutrofização é confirmada, frisando que o Valor Trófico de Referência da eutrofização é de 54.

Portanto, considerando o período total de 2009 a 2022, com IET multimodelo global de 63, então o estado trófico do reservatório Araras está caracterizado em condição de eutrofização, assim a caracterização da eutrofização classificada pela avaliação multimodelo IET alerta para a condição trófica crítica constatada categoricamente na Escala de Intensidade Trófica (EIT) de caracterização da eutrofização de reservatório do semiárido tropical cearense.

A caracterização da eutrofização do reservatório Araras, realizada mediante essas metodologias desenvolvidas e aplicadas holisticamente integrando e abrangendo o conjunto de modelos de IET inteiramente capaz de caracterizar diferentes situações tróficas, tem o seu propósito precípuo de ser estendida para os demais reservatórios do Ceará a partir deste estudo de caso específico, sendo de pleno interesse para a gestão das águas com a peculiaridade climática da região semiárida, onde escassez e gestão hídricas são dois lados da mesma questão.

6.0 CONCLUSÃO

A avaliação multimodelo IET integrando positivamente divergências, diferenças e limitações de modelo de IET individual, fundamentada nos dados de entrada de variáveis limnológicas e hidroclimáticas disponibilizadas em caráter público como parâmetros, volume e precipitação, correlacionando-as para mediar a força da associação entre todas essas variáveis.

E assim se compôs a abordagem multimodelo IET que produziu as faixas tróficas de atuação com intervalos partir dos quais se fez a caracterização da eutrofização do reservatório Araras, conforme condições e intensidades tróficas estabelecidas pelas metodologias propostas.

Esta metodologia multimodelo IET concluiu que o volume percentual do reservatório foi a variável que mais influenciou na qualidade da água refletida pelos IETs multimodelo uma vez compostos pelos dados provenientes dos parâmetros PT; NT; DS; Chl-*a* que elevavam os valores dos IETs quanto menor estivesse o nível do volume percentual de água no reservatório.

Dois modelos apontaram majoritariamente que o Nitrogênio se configurou como o nutriente limitante da eutrofização no reservatório Araras no decorrer do período que se concentrou este estudo com ressalvas que colocam o Fósforo em posição relevante de limitação.

As divergências estruturais entre os cinco principais modelos de IET mais utilizados serviram favoravelmente para desenvolver a faixa trófica multimodelo solucionando assim as limitações de utilização de modelos isolados, gerando faixas de ampla atuação com a obtenção da faixa de valor mínimo ao valor máximo do modelo de IET mais restritivo ao menos restritivo.

A faixa trófica ao apresentar classificações tróficas distintas pelas justificáveis diferenças entre os modelos, desconsiderou-se, portanto, a classificação que pode promover inconsistência e adotou o cálculo do risco de eutrofização associado ao método multimodelo, obtendo assim as duas condições: a condição de eutrofização e a condição de não-eutrofização.

Propôs-se a Escala de Intensidade Trófica com intervalo de 0 a 99 com o valor 54 como o valor limiar da eutrofização fundamentado a partir da avaliação multimodelo assim se identificou e caracterizou a intensidade com que as condições tróficas estavam acontecendo ou afetando a qualidade da água no reservatório Araras durante o monitoramento de 2009 a 2022.

O reservatório Araras na avaliação multimodelo, considerando o valor médio integral do período de monitoramento de 2009 a 2022, identifica-se na Escala de Intensidade Trófica com o Valor de Intensidade Trófico 63, logo o reservatório está caracterizado integralmente na Condição de Eutrofização, com o valor da Intensidade da Eutrofização acima do Valor Trófico de Referência pode atribuir no geral à situação do reservatório um carácter muito preocupante.

Como os 14 anos de monitoramento que esta pesquisa se concentrou foi um período que refletiu diferentes realidades de secas e cheias, dividiu-o em 4 subperíodos para representar essas realidades: de 2009 a 2013 o reservatório Araras foi caracterizado como eutrofizado com intensidade 62; de 2014 a 2017 eutrofizado caracterizado com intensidade 74; de 2017 a 2019 eutrofizado caracterizado com intensidade 63; de 2020 a 2022 o reservatório foi caracterizado em condição de Não-eutrofização com a intensidade de 53 na Escala de Intensidade Trófica.

Na área de recursos hídricos o planejamento e as ações dependem das tomadas de decisões que têm no seu ente regional de gestão a instância mais importante para consultar e deliberar de forma participativa e integrada com os representantes dos usuários, sociedade civil, prefeituras e órgãos estaduais para decidirem sobre o que afeta as águas em qualidade e quantidade de maneira que a gestão participativa e integrada dos recursos hídricos atenda aos anseios da coletividade com propósitos sustentáveis, econômicos e sociais em sua totalidade.

Então a informação sucinta e precisa que esta abordagem multimodelo traz em seus resultados serão de grande valia no gerenciamento, monitoramento e principalmente como ferramenta para as deliberações dos Comitês de Bacias para a gestão dos recursos hídricos, com o caso do reservatório Araras, com suas relações com o uso e ocupação do solo incluindo agricultura, pecuária; piscicultura; e questões sanitárias em seu entorno e na bacia hidrográfica.

A EIT é sucinta e permite a compreensão necessária e objetiva de como estar o estado trófico do corpo d'água, que além do entendimento rápido e fácil pela disposição dos intervalos da escala, a mesma está marcada em cores, sendo que a cor azul representa não-eutrofização, o amarelo como “alerta” de eutrofização e o vermelho representa a eutrofização do corpo hídrico.

Além do mais, considerando-se convenientemente, os intervalos com que a escala foi desenvolvida permitem facilmente associar as classes tróficas ao respectivo valor de intensidade escalar, consagrando-se, portanto, de abrangência integral contemplando as informações mais precisas e relevantes para auxiliar na solução dos problemas da eutrofização.

Recomenda-se para trabalhos futuros que esta metodologia seja estendida para a caracterização trófica dos demais reservatórios do estado do Ceará de importância coletiva à sociedade para se ter uma visão panorâmica com projeções que fundamentem mais e novas pesquisas contemplando cenário de aquecimento global, que se torna o maior problema global.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, M.; JAVID, A.H.; MIRBAGHERI, S.A.; AHMADI GIVI, F.; MOGHIM, P. **Investigation of lake drying attributed to climate change**. Int. J. Environ. Sci. Technol, v. 9, p. 257-266, jan. 2012. Disponível em: 10.1007/s13762-012-0031-0. Acesso em: 14 de dezembro de 2022.
- ALVES, M.S.; RIBEIRO LIMA, G.R.; ARAÚJO, A.L.C.; da SILVA, F. J. A.; PEREIRA, E.L. **Simulation in the evaluation of failure probability in waste stabilization ponds**. Journal of Water Process Engineering, v. 38, p. 101658. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101658>. Acesso em: 16 de julho de 2022.
- AMMAR, R.; KAZPARD, V.; EL SAMRANI, A. G.; AMACHA, N.; SAAD, Z.; CHOU, L. **Hydrodynamic influence on reservoir sustainability in semi-arid climate: A physicochemical and environmental isotopic study**. Journal of Environmental Management, v. 197, p. 571-581. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.030>. Acesso em: 20 de março de 2022.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Portal da Qualidade das Águas**. Brasília. 2017. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>. Acesso em 25 de agosto de 2022
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO. **Monitoramento da Qualidade da Água em Rios e Reservatórios - Variáveis e parâmetros de qualidade de água em rios e reservatórios. Unidade 3 variáveis e parâmetros de qualidade de água em rios e reservatórios**, 2022. Disponível em: http://dspace.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2227/3/Unidade_3.pdf. Acesso em 14 de dezembro de 2022.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação**. Relatório Final. 2016. Agência Nacional de Águas Brasília: ANA, Engecorps Engenharia S.A. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c3c25b76-f711-41ea-a79e-c8d30c287e53>. Acesso em: 03 outubro de 2023.
- ARANHA, T. R. B. T. MARTINEZ, J.M.; SOUZA, E.P.; BARROS, M.U.G.; MARTINS, E.S.P.R. **Remote Analysis of the Chlorophyll-a Concentration Using Sentinel-2 MSI Images in a Semiarid Environment in Northeastern Brazil**. 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69395>. Acesso em: 14 de outubro de 2022.
- ARAÚJO, D. R.; MENDONÇA, A. S. F.; REIS, A. T. **Análise de variação e comparação de índices de estado trófico: reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos de Rio Bonito e Suíça** - Eng Sanit Ambient | v.23 n.1 | jan/fev. 2018 |. Disponível em <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018162462>. Acesso em: 4 de janeiro de 2022.
- ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. **A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil**. Water

International, [s.l.], v. 41, n. 2, p. 213–230, 23 fev. 2016. Disponível em:
<https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1113077>. Acesso em: 21 de março de 2023.

ARAÚJO, R.B.A.; SOUSA, D.L.; LIMA NETO, I. E. **Modelagem do Coeficiente de Decaimento de Fósforo para determinar o Índice de Estado Trófico (IET) do Reservatório Banabuiú – CE**, 2020. Disponível em:
<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/68761>. Acesso em: 04 de novembro de 2022.

BARBOSA, J.E.L., MEDEIROS, E.S.F., BRASIL, J., CORDEIRO, R.S., CRISPIM, M.C.B.; SILVA, H.G. R. da S. CORDEIRO, M.C.B. CRISPIM & G.H.G. da SILVA. **Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management**. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2012, 24(1), 103-118. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000030>. Acesso em: 17 de janeiro de 2023.

BARRETO, L. V.; BARROS, F. M.; BONOMO, P.; ROCHA, F.A. & AMORIN, J. **Eutrofização em rios brasileiros**. 2013. Enciclopédia biosfera. Disponível em:
<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/biologicas/EUTROFIZACAO.pdf>. Acesso em 23 fev. 2023.

BARROS, L. R. **O índice do estado trófico e sua adaptação para os sistemas lênticos do semiárido cearense**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em:
<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11599>. Acesso em: 12 de novembro de 2022.

BATISTA, A. A.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; IZÍDIO, N. S. C.; LOPES, F. B. **Sazonalidade e variação espacial do índice de estado trófico do açude Orós, Ceará, Brasil**. *Revista Agro@ambiental On-line*. V. 8, n. 1, p. 39-48, 2014. Disponível em:
<https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i1.1362>. Acesso em: 2 de março de 2023.

BEGHELLI, F. G. F.; FRASCARELI D.; POMPÊO, M. L. M.; MOSCHINI-CARLOS, V. **Trophic State Evolution over 15 Years in a Tropical Reservoir with Low Nitrogen Concentrations and Cyanobacteria Predominance**. 2016. *Water Air Soil Pollut* 227: 95. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X211710.1007/s11270-016-2795>. Acesso em: 27 de fevereiro 2023.

BEM, C. C.; RODRIGUES, J. C. de A.; BRAGA, M. C. B. **Aplicação e análise dos índices de estado trófico - IET: estudo de caso do lago Barigui**. - XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – 2009. Disponível em:
<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=110&SUMARIO=1817>. Acesso em: 7 de dezembro de 2022.

BEZERRA, A. F. M.; BECKER, V.; MATTOS, A. **Balanço de Massa de Fósforo Total e o Estado Trófico em Reservatórios do Semiárido Brasileiro**, 2014. Disponível em:
<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/30929>. Acesso em: 5 de outubro de 2022.

BEZERRA, A.F.M., TORRES, L.M., GALVÃO, Â.M.F. and MATTOS, A. **Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region**. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2015, 27(1), 15-23. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2214>. Acesso em: 27 de fev de 2023.

BILGIN, A. **Trophic state and limiting nutrient evaluations using trophic state/level index methods: a case study of Borçka Dam Lake.** Environ Monit Assess. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08741-0>. Acesso em: 20 de agosto de 2022.

BRAGA, Gustavo Girão *et al.* **Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region.** *Acta Limnologica Brasiliensia*, 27(1), 15-23. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2214>. Acesso em: 14 de set. de 2022.

BRAGA, G. G., BECKER, V., OLIVEIRA, J.N. P., MENDONÇA JÚNIOR, J. R. **Impacts of drying and reflooding on water quality of a tropical semi-arid reservoir during an extended drought event.** *ACCA Limnol, Bras.* 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S2179-975X6918>> Acesso em: 12 de fev. de 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Portaria no 80. **Resolução Condel/Sudene nº 150**, de 13 de dez de 2021. Diário Oficial da União, Brasília, 29 dez 2021 Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-condel/sudene-n-150-de-13-de-dezembro-de-2021-370970623>. Acesso em: 17 de novembro de 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 25 de ago. de 2022.

CAMPOS, N.; STUDART, T. (Org). **Gestão de águas: princípios e práticas.** Porto alegre: ABRH, 2001. 255 p.

CARLSON, Robert E. **Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs.** Enhancing the States' Lake Management Programs, 1991. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/246134025>. Acesso em: 1 set. 2022.

CARLSON, Robert E. **A trophic state index for lakes.** *Limnology and Oceanography*, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>. Acesso em: 10 de junho de 2022.

CARNEIRO, B. L. D. S.; ROCHA, M. J. D.; BARROS, M. U. G.; PAULINO, W. D.; LIMA NETO, I. E. **Predicting anoxia in the wet and dry periods of tropical semiarid reservoirs.** *Journal of Environmental Management*, v. 326, p. 116720, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116720>. Acesso em: 21 de novembro de 2022.

CARNEIRO, F. M. *et al.* **Determinants of chlorophyll-a concentration in tropical reservoirs.** *Hydrobiologia*, [s.l], v. 740, n. 1, p. 89–99, nov. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1940-3>. Acesso em: 23 dezembro 2022.

CARPENTER, S. R. **“Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication”.** 2008 Center for Limnology, University of Wisconsin, Madison. PNAS/August 12, 2008. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806112105>. Acesso em: 5 de agosto de 2022.

CARVALHO, A. T. F. **Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil.** 2020. Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n. 42, v. 1, p. 140-161, jan-jun, 2020. Disponível em: <http://orcid.org/0000-0002-6642-3802>. Acesso em: 12 de julho de 2023.

CAVALCANTE, H.; ARAUJO, F. BECKER, V. **Phosphorus dynamics in the water of tropical semiarid reservoirs in a prolonged drought period**, 2018b. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X1617>. Acesso em 07 de fevereiro de 2023.

CEARÁ. **Planejamento estratégico dos comitês de bacias hidrográficas do estado do Ceará. Ceará: Secretaria de Recursos Hídricos**, 2006. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2018/07/planejamento-estrategico-comite-bacias.pdf>. Acesso em: 03 de novembro de 2023.

CEARÁ. **Portal Hidrológico do Ceará**. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/acude/niveldiario#8>. Acesso em: 11 janeiro de 2023.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **IET – Índice do Estado Trófico**. 2009. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/04.pdf> Acesso em: 15 fev. 2023.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo. Apêndice D – Índices de Qualidade das Águas**. 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%AAndice-D-%C3%8Dndices-de-Qualidade-das-%C3%81guas.pdf>. Acesso em: 03 abril 2023.

CHANG, C.; CAI, L.; LIN, T.; CHUNG, C.; LINDEN, L.; BURCH, M. 2015. **Assessment of the impacts of climate change on the water quality of a small deep reservoir in a humid-subtropical climatic region**. Water, v. 7, n. 4, p. 1687-1711, 2015. Disponível em: <https://bio.gov/10.3390/w7041687>. Acesso em: 7 de junho de 2022.

CHAVES, F. I. B., LIMA, P. F., LEITÃO, R. C., PAULINO, W. D., SANTAELLA, S. T. **Influence of rainfall on the trophic status of a Brazilian semiarid reservoir**. Acta Scientiarum. ISSN on-line: 1807-863X. 2013. Disponível em: <https://doi.gov/10.4025/actascibiolsoci.v35i4.18261>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2023.

CHELLAPPA, S.; BUENO, R. M.; CHELLAPPA, T.; CHELLAPPA, N.T.; VAL, V. MFA. **Reproductive seasonality of the fish fauna and limnoecology of semi-arid Brazilian reservoirs**. 2009. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters, 39: 325-329. Disponível em: 10.1016/j.limno.2009.06.003. Acesso em: 14 de outubro de 2022.

GGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Inventários Ambientais de Açudes da Bacia do Acaraú – Açude Araras**. 2018. Disponível em: https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2018/01/IVA-Araras_PSH.pdf. Acesso em: 14 de novembro de 2022.

COGERH. **Sistema de informações do plano de manutenção e operação da Cogerh: dados de qualidade de água, 2022**. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/>. Acesso em: 23 de fev. de 2023.

CORDEIRO, R. I. P. **Deteção do potencial cianotóxico em águas superficiais do Arquipélago dos Açores através de métodos moleculares**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Biomédicas) – Departamento de Biologia, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, Portugal, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.3/3667>. Acesso em: 24 ago. 2022.

CPRM. COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS. **Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará.** Org.: Fernando Feitosa. Fortaleza, 1998

CUNHA, D. G. F.; FINKLER, N. R.; LAMPARELLI, M. C.; CALIJURI, M. C.; DODDS, W. K.; CARLSON, R. E. **Characterizing Trophic State in Tropical/Subtropical Reservoirs: Deviations among Indexes in the Lower Latitudes.** 2021. Environmental Management (2021).Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01521-7>. Acesso em: 7 maio 2023.

CUNHA, D.G.F. **Heterogeneidade espacial e variabilidade temporal do reservatório de Itupararanga: uma contribuição ao manejo sustentável dos recursos hídricos da bacia do Rio Sorocaba (sp).** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2012.

CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M. do C.; LAMPARELLI, M.C. **A Trophic State Index for Tropical/subtropical Reservoirs (TSIts).** Ecological Engineering. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>. Acesso em: 17 de abril de 2022.

CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M. do C.; LAMPARELLI, M.C.; MENEGON Jr., N. **Resolução CONAMA 357/2005: análise espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do Estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005-2009).** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 18, n. abr./ju 2013, p. 159-168, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522013000200008>. Acesso em: 18 nov. 2023.

DODDS W.K, COLE J.J. **Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: it's not just the autotrophs.** 2007. Aquat Sci. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00027-007-0922-1>. Acesso em: 25 de agosto de 2022.

ESTEVEZ, Francisco de Assis. **Fundamentos de limnologia.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FANG, Y.P.; DENG, W. **The critical scale and section management of cascade hydropower exploitation in Southwestern China.** 2011. Energy, v. 36, n. 10, p. 5944-5953, 2011. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j>. Disponível em: 28 de agosto de 2022.

FRANÇA, J.M.B.; SILVA, S.M.O; MONTEIRO, C. M.G.; PAULINO, W.D.; CAPELO N. J.; Qualidade da água em um sistema de reservatórios em cascata – um estudo de caso no semiárido brasileiro. 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200328>. Acesso em: 30 de dezembro de 2022.

FREIRE, F. B. A.; SOUSA, D. L.; LIMA NETO, I. E.; CASTRO, M. A. H. **Modelagem do coeficiente de decaimento de fósforo para determinar o Índice de Estado Trófico (IET) do reservatório Banabuiú-CE.** 2020. Revista DAE | São Paulo | v. 70, n 235/pp 142-152 | Ed. Esp. Mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.026>. Acesso em: 13 de dezembro de 2022.

FREIRE, L.L.; SOUSA FILHO, F.A. **Inter-relações entre preditores de eutrofização em reservatórios do semiárido brasileiro: como mensurar? Uma aplicação de aprendizado de máquina por árvores de decisão.** Eng Sanit Ambient | v.27 n.6 | nov/dez 2022 | 1155-1165. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220099>. Acesso em: 4 maio 2023.

GELETU, T. T. *et al.* **Lake eutrophication: control of phytoplankton overgrowth and invasive aquatic weeds. Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use.** 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/lre.12425>. Acesso em: 23 junho de 2023.

GRIGG, NEIL. **Water resources management: principles, regulations and cases.** New York: McGraw-Hill, 1996, 540 p.

GUIMARÃES, B. M.D.M. **Análise e predição da concentração de clorofila a em reservatórios do semiárido. Dissertação de Mestrado.** UFC. 2023. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/71274>. Acesso em: 14 de julho de 2023.

Jl, Z. **Hydrodynamics and Water Quality: modeling rivers, lakes and estuaries.** 2. ed. Hoboken: Wiley, 2017.

JIMENO-SÁEZ, P.; SENENT-APARICIO, J.; CECILIA, J.M.; PÉREZ-SÁNCHEZ, J. Using machine-learning algorithms to eutrophication modeling: case study of Mar Menor Lagoon (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 4, 1189, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17041189>. Acesso em 23 fev de 2023.

JÚLIO-JÚNIOR, H. F. *et al.* **Distribuição e caracterização dos reservatórios.** In: RODRIGUES, L.; THOMAZ, S. M.; AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C. (Org.). *Biocenose em reservatórios: padrões espaciais e temporais.* Maringá: Rima, 2005.

JUNIOR, C. A. N. da R.; COSTA, M. R. A. da.; MENEZES, R. F. **Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs.** 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/30856>. Acesso em: 14 de maio de 2022.

JUNQUEIRA, M. A. D. R.; SAIANI, C. C. S.; PASSADOR, C.S. Apontamentos sobre a lei brasileira das águas: a experiência do estado de São Paulo. *REGE*, São Paulo – SP, Brasil, v. 18, n. 2, p. 159-175, abr./jun. 2011. Disponível em: DOI: 10.5700/rege 420. Acesso em: 01 de novembro de 2023.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Populacional 2020.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil>. Acesso em: 29 de outubro de 2023.

KLIPPEL, G., MACEDO, R.L., BRANCO, C. W. C. **Comparison of different trophic state indices applied to tropical reservoirs.** 2020. *LAKES RESERVOIRS*. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/lre.12320>. Acesso em: 03 novembro 2022.

KRATZER, C. R.; BREZONIK, P. L. **A Carlson type trophic state index for nitrogen in Florida lakes.** *Water Resources Bulletin*, v. 17, n. 4, p. 713-715, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282>. Acesso em 12 de fevereiro 2023.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de Trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de Monitoramento,** 2004. Tese de Doutorado. Unidade da USP. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.41.2004.tde-20032006-075813>. Acesso em: 17 de março de 2022.

LIANG, Z.; SORANNO, P. A.; WAGNER, T. **The role of phosphorus and nitrogen on chlorophyll a: Evidence from hundreds of lakes.** 2020. Water Research. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116236>. Acesso em 28 de março de 2023.

LIMA, Thales Bruno Rodrigues. **Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos.** Dissertação de Mestrado, 2020, UFC. Pág 14.

LOPES, L. F.; SILVA, S.S.; SILVA, J.F. **Avaliação da influência espaço-temporal nos índices de trofia da bacia hidrográfica do Rio Verde Grande.** L Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2021 - CONBEA 2021 08 a 10 de novembro de 2021 Congresso Online Disponível em: <https://www.conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2021/livros-2021/saneamento-e-gestao-ambiental-sga-3/3057>. Acesso em: 20 de outubro 2023.

LOPES, L. F. **Estado Trófico da bacia hidrográfica dos afluentes mineiros do Rio Verde Grande. 2019.** Monografia de Pós-Graduação. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/38309/1/Monografia%20p%C3%B3s%20gradua%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 01 de outubro de 2023.

MABERLY, S. C.; JO-ANNE PITT, P. SIAN DAVIES & LAURENCE CARVALHO. **Nitrogen and phosphorus limitation and the management of small productive lakes.** Inland Waters. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/20442041.2020.1714384>, 2020. Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

MARKED, A. T.; LANDGE, A. T.; NAYAK, B. B.; INAMDAR, A. B.; MISHA A. K. **Trophic state modeling for shallow freshwater reservoir: a new approach.** 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7740-5>. Acesso em: 30 de agosto de 2022.

MEIRELES, A. C. M.; ANDRANDE, E. M.; FRISCHKORN, H.; CRISOSTOMO, L. A.; PALÁCIO, H. A. Q. **Avaliação das águas do açude Araras utilizadas para irrigação, Bacia do Acaraú – Ceará.** 2017. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

MISHA, R. K. **The Effect of Eutrophication on Drinking Water.** British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies. 2023. Published by the European Centre for Research Training and Development UK. Disponível em: <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0096>. Acesso em: 20 junho 2023.

MOLISANI, M. M., BARROSO, H. S., BECKER, H., MOREIRA, M. O. P., HIJO, C. A. G., MONTE, T. M., VASCONCELOS, G. H. **Trophic state, phytoplankton assemblages and limnological diagnosis of the Castanhão reservoir, CE, Brazil.** Acta Limnologica Brasiliensia, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/actalb.02201001>. Acesso em: 17 de julho de 2022.

MOREIRA, D. S. **O Comitê de bacia como instrumento de democratização dos recursos hídricos. Um estudo de caso: a atuação do Comitê da Bacia do Acaraú – Ceará.** 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11594>. Acesso em: 16 de abril de 2022.

MORIASI, D. N. *et al.* **Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria.** Transactions of the ASABE, [s.l], v. 58, n. 6, p. 1763–1785, dez. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/289540757>. Acesso em: 25 jul 2022.

MOSLEY, L.M. **Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration.** Earth-Science Reviews, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.010>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2022.

MOURA FILHO, H. M., ARAÚJO, G. M. **Trophic state of the rosary reservoir located in the municipality of Lavras da Mangabeira-CE, northeast semiarid.** Research, Society and Development, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5761>. Acesso em: 07 de abril de 2022.

NASCIMENTO, E. D.; MAIA, C. M. M.; ARAÚJO, M. F. F. **Contaminação da Água de Reservatórios do Semiárido Potiguar por Bactérias de Importância Médica,** 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1801> Acesso em: 28 de setembro de 2022.

NOBRE, R.L.G.; CALIMAN, A.; CABRAL, C.R.; DE CARVALHO ARAÚJO, F.; **Precipitation, landscape properties and land use interactively affect water quality of tropical freshwaters.** Science of the Total Environment, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137044>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

NOGUEIRA, VICENTE P. Q. **Qualidade da água em Lagos e Reservatórios.** In: PORTO, R. L. L.; BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W. et al. Hidrologia ambiental. v.3. São Paulo: Edusp: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991. Disponível em: http://www.profagua.uerj.br/ementas/mpa_027.pdf. Acesso em: 17 de outubro de 2022.

NORONHA, V. S. **Análise temporal do Índice de Estado Trófico em reservatório artificial na região semiárida do Nordeste brasileiro.** 2022. TCC. UFC. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/69229>. Acesso em: 13 junho de 2023.

OLIVEIRA, A. R. M. **Desenvolvimento de índice de qualidade água com número reduzido de parâmetros.** 2017. Universidade Federal de Viçosa. Tese de Doutorado. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/18524/1/texto%20completo.pdf>. Acessado em: 10 de setembro 2023.

OYAMA, M.D. and NOBRE, C.A. **Climatic consequences of a large-scale desertification in Northeast Brazil: a GCM simulation study.** Journal of Climate, 2004. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3203:CCOALD>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3203:CCOALD>2.0.CO;2)

PAULINO, W. D; OLIVEIRA, R. R.; AVELINO, F.F. **Classificação do estado trófico para o gerenciamento de reservatórios no semiárido: a experiência da Cogerh no estado do Ceará.** 2013. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. SBRH2013__PAP013276. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/xxsbrh>. Acesso em: 14 de dezembro de 2022.

PEREIRA FILHO, W. **Influência dos diferentes tipos de uso da terra em bacias hidrográficas sobre sistemas aquáticos da margem esquerda do Reservatório de Ucuruí-Pará.** 2000. 130 f. Tese (Doutorado em Geografia). USP, São Paulo, 2000.

PEREIRA, M. F. P.; BARBIEIRO, B. L.; QUEVEDO, D. M. de. **Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos**. 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-43458. Acesso em: 02 nov de 2023.

PRADA, S. M.; OLIVEIRA, E. de **Distribuição de nutrientes (C, N e P) em testemunhos de sedimentos do reservatório das Garças, Cotia – SP**, In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 29., 2006, São Paulo. Anais. São Paulo, 2006.

POMARI, J., KANE, D. D., NOGUEIRA, M. G. **Application of multiple-use indices to assess reservoirs water quality and the use of plankton community data for biomonitoring purposes**. International Journal of Hydrology. 2018. Int J Hydro. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324515686>. Acesso em: 5 de maio de 2022.

REDFIELD, A.C. **The biological control of Chemical factors in the invironmental**. 1958. American Scientist. Disponível em: https://ebme.marine.rutgers.edu/HistoryEarthSystems/HistEarthSystems_Fall2008/Week4b/Redfield_AmSci_1958.pdf. Acesso em: 19 de novembro de 2022.

ROCHA JÚNIOR, C. A. N.; COSTA, M. R. A.; MENEZES, R. F.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. **Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs**. Acta Limnologica Brasiliensia, v. 30, e106, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2117>. Acesso em: 28 de dezembro de 2022.

ROCHA, M. J. D.; MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. **Análise e modelagem das relações entre nutrientes e fitoplâncton em reservatórios do Ceará**. 2019. Disponível em: 10.5327/Z2176-947820190536. Acesso em: 14 de dezembro de 2022.

ROCHA, M. J. D.; LIMA NETO, I. E. **Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs**. Environmental Science and Pollution Research (2022) 29:10027–10046. Acesso em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16251-w>. Acesso em: 09 de junho de 2022.

ROLIM, H. O. **Proposta de índice de estado trófico em reservatórios do semiárido a partir de dados da bacia do Banabuiú, estado do Ceará**. 2016. p. 90. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFC, Fortaleza, 2016.

ROLIM, H. O.; NUNES, A. B. A.; NASCIMENTO, F. J. S. C.; CHAVES, J. R. **Proposal of a trophic state index in semiarid reservoirs using data of the Banabuiú Basin, state of Ceará, Brazil**. 2019. Acta Limnologica Brasiliensia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X12517>. Acesso em: 5 de dezembro de 2022.

ROSENDO, E. A. A. **Análise multivariada aplicada ao estudo do fósforo total em reservatórios da bacia hidrográfica do Acaraú-Ce**. 2022. TCC. UFC. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/64230>. Acesso em: 15 de junho de 2023.

SANTOS, J. A.; MARINS, R. V.; AGUIAR, J. E.; CHALAR, G.; SILVA, A. T. F.; LACERDA, L. D. **Hydrochemistry and trophic state change in a large reservoir in the Brazilian northeast region under intense drought conditions**. J. Limnol., 2017. ORIGINAL ARTICLE. Disponível <http://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1433>. Acesso em: 1 de novembro de 2022.

SANTOS, L. C. D.; NHAMPOSSA, J. A.; COSTA, C. C.; GOMES, L. J.; **Atuação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe na denúncia e encaminhamento de conflitos socioambientais**. REGA, v. 12, n. 2, p. 35-45, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rega.v12n2.p35-45>. Acesso em: 07 de novembro de 2023.

SARDINHA, D. S.; SOUZA, A. D. G. DE.; SILVA, A. M. DA.; LIBANIO, C. R.; MENEZES, P. H. B. J.; TIEZZI, R. DE O. **Índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) aplicado em afluente da Represa Bortolan em Poços de Caldas (MG)**, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2019.018>. Acesso em: 09 de novembro de 2022.

SILVA, F. L.; FUSHITA, A. T.; CUNHA-SANTINO, M. B.; JÚNIOR, I. B.; JÚNIOR, J. C. T. **V. Gestão de Recursos Hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias**. Revista Brasileira de Geografia Física. V.14, n.3, 2021. Disponível em: [10.26848/rbgf.v14.3.p1626-1653](https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1626-1653). Acesso em: 14 de julho de 2023.

SILVA NETTO, J. P. **Panorama da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil**. Revista **Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 241-258, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.59306/rgsa.v11e22022241-258>. Acesso em 20 de junho de 2023.

SILVA, U. P. A. COSTA, A. M.; LIMA, G. P. B.; LIMA, B. P. **Experiência da Alocação Negociada de Água nos Vales do Jaguaribe e Banabuiú** In: VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006, Gravatá. Recursos Hídricos do Nordeste, 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-porta>. Acesso em: 20 de maio de 2023.

SILVA, D.C.; SOUSA FILHO, F.A.; AQUINO, S.H.S.; SILVA, SILVA, S. M.O. **Diagnóstico Institucional da Alocação Negociada de Água no estado do Ceará à Luz do Framework de Elinor Ostrom**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – 2013. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=1391>. Acesso em: 13 abril de 2023.

SOUZA FILHO, F. A. (2018). **“CEARÁ 2050: diagnóstico dos recursos hídricos”**. Fortaleza: UFC, 2018. 94 p.

TOLEDO JÚNIOR, A. P. **Informe preliminar sobre os estudos para a obtenção de um índice para avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais**. São Paulo: CETESB, 1990. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2693>. Acesso em: 07 de fev. de 2022.

TOLEDO JÚNIOR, A.P.; TALARICO, M.; CHINEZ, S.J.; AGUDO, E.G. **A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Balneário Camboriú, Santa Catarina, 1983. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2546>. Acesso em: 19 de jan. de 2022.

TOMAZ, P. **Análise da qualidade da água de rios e impactos de nitrogênio e fósforo rios e córregos**. 2008. Disponível em: http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/livro_nitrogenio/livro_qualidade_im_actos.pdf. Acesso 20 fev de 2023.

TONÉ, A. J. A. **Análise e Modelagem de Fósforo em Reservatórios Localizados em Regiões Semiáridas**. 2016. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/22057>. Acesso em: 19 de janeiro de 2022.

TUNDISI, J.G.; TUNDISI, T.M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/43630915/Limnologia_Tundisi_LIVRO_pdf. Acesso em: 14 de fevereiro de 2022.

VON SPERLING, E. **Uso de relações limnológicas para avaliação da qualidade da água em mananciais de abastecimento**. In Anais Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. v. 1, 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4º ed. UFMG, Belo Horizonte, 470p, 2014.

WIEGAND, M. C.; NASCIMENTO, A. T. P.; COSTA, A. C.; LIMA NETO, I. E. **Avaliação de nutriente limitante da produção algal em reservatórios do semiárido brasileiro**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais • Brazilian Journal of Environmental Sciences. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200681>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

WIEGAND, M.C.; DO NASCIMENTO, A.T.P.; COSTA, A.C.; LIMA NETO, I. E. **Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability**. 2021. Journal of Arid Environments, v. 184, p. 104321, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/73012>. Acesso em: 2 de junho de 2022.

WIEGAND, M.C.; PIEDRA, J.I.G.; ARAÚJO, J.C. **Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil)**. Eng. Sanit. Ambient, v. 21, n. 2, p. 415-424, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016139527>. Acesso em: 14 de agosto de 2022.

YANG, X.; WU, X.; HAO, H; HE, Z. **Mechanisms and assessment of water eutrophication**. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>. Acesso em: 25 de julho de 2022.

ZANELLA, M. E. **Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino**. 2014. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/3176>. Acesso em: 17 de junho de 2022.