



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

THIAGO TEIXEIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS LIMNOLÓGICOS EM RESERVATÓRIOS DO
SEMIÁRIDO CEARENSE: UMA PROPOSTA DE ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO**

FORTALEZA

2024

THIAGO TEIXEIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS LIMNOLÓGICOS EM RESERVATÓRIOS DO
SEMIÁRIDO CEARENSE: UMA PROPOSTA DE ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

Tese de doutorado submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Química da
Universidade Federal do Ceará como requisito
à obtenção do título de doutor em Química.
Área de concentração: Química Analítica.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª Helena Becker.

Co-orientadora: Prof^ª. Dr^ª Gisele Simone Lopes

FORTALEZA

2024

THIAGO TEIXEIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS LIMNOLÓGICOS EM RESERVATÓRIOS DO
SEMIÁRIDO CEARENSE: UMA PROPOSTA DE ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

Tese submetida à Coordenação do Programa de
Pós-Graduação em Química da Universidade
Federal do Ceará como requisito parcial à
obtenção do título de doutor em Química.
Área de concentração: Química Analítica.

Aprovada em: 29/01/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Helena Becker (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Gisele Simone Lopes (Co-orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Henrique Barbosa de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes (Membro Externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Wagner de Sousa (Membro Externo)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

A Deus.

A minha esposa e filha.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por todas as bênçãos recebidas.

A minha esposa Marianna de Andrade Saraiva, pelo amor, carinho, respeito e companhia que só ela pode transmitir a minha vida. Você me ajuda a ser, cada vez mais, uma pessoa um pouco melhor. Te amo.

Ao meu “pequeno amor”, Milena. Filha querida, você não contribuiu em nada com a elaboração deste trabalho, mas sua presença, alegria e esperteza me ajudaram a descansar e restaurar um pouco as forças para prosseguir com a pesquisa.

A meus pais Reinaldo e Roseane, por me amarem, educarem e apoiarem em minhas decisões de estudo, de trabalho e de amores.

A Prof. Dra. Helena Becker, por toda, conversa, advertência e orientação nesse trabalho e na vida como cidadão e químico.

Aos professores participantes da banca avaliadora: Prof. Dra. Gisele Simone Lopes, Prof. Dr. André Henrique Barbosa de Oliveira, Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes e Prof. Dr. Francisco Wagner de Sousa por terem aceitado esse convite, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), em nome de Walt Disney Paulino, por disponibilizar parte dos dados dessa pesquisa e também incentivar o trabalho.

A instituição UFC, que me permitiu cursar minha graduação, meu mestrado e por fim meu doutorado. Sou muito satisfeito em fazer parte dessa Universidade como egresso e como servidor público.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Todos nós mudamos, quando você pensa sobre isso. Somos todos pessoas diferentes ao longo de nossas vidas. E tudo bem, tudo bem, você tem que seguir em frente, desde que se lembre de todas as pessoas que você costumava ser. Não esquecerei uma linha disso. Nem um dia. Juro. Sempre me lembrarei de quando o Doutor era eu.

(Doctor Who)

RESUMO

A ampla utilização da água na vida humana torna necessária a qualidade da mesma, visando o bem-estar da população, da fauna e da flora. Reservatórios naturais ou artificiais são grandes fontes de armazenamento de água, utilizada amplamente para abastecimento e irrigação. Um estudo recente afirma que as águas de reservatórios ainda serão fundamentais por pelos próximos 30 anos, devido ao aumento de demanda prevista. Em reservatórios da região semiárida, observa-se aspectos de não-qualidade destas águas, tanto por valores de referência de padrão de qualidade indicados pelo CONAMA, como decorrente da avaliação de índices, como IET e IQA. Com essas características, a região do Semiárido brasileiro possui uma quantidade não abundante de água em seus reservatórios e com baixa qualidade em diversos pontos. Para auxiliar na tomada de decisão de iniciativas adequadas na resolução dessa problemática, este trabalho buscou elaborar um novo IET levando em consideração dados e as condições de reservatórios do semiárido cearense, avaliando 18 parâmetros por meio de procedimentos padrões e as correlações entre eles. Os dados foram disponibilizados pela COGERH, nos anos de 2014 – 2022, para 25 reservatórios administrados pela companhia. Foi feita estatística descritiva para cada conjunto de dados dos parâmetros, com remoção de valores *outliers* para avaliação das tendências de variação destes nos reservatórios. Estudo exploratório também foi realizado, no estudo de correlações para os parâmetros versus transparência, a fim de construir o índice proposto, com devidas adaptações nas expressões de Carlson (1977). Os parâmetros analisados tiveram alta variabilidade em suas medidas, com ocorrência de valores extremamente elevados em alguns parâmetros, como contagem de cianobactérias, estando inclusive em desacordo com uma resolução federal. No levantamento de dados realizado, foi selecionado a medida máxima de transparência observada no reservatório Pentecoste para guiar as adaptações nas expressões de Carlson (1977). O fósforo foi identificado como o principal nutriente limitante em 80% dos reservatórios. Os parâmetros fósforo total, nitrogênio total, clorofila *a* e turbidez apresentaram as correlações mais significativas (superiores a 0,4) para composição do novo IET proposto. Realizou-se uma adaptação na expressão base do IET, para estar associada com valores obtidos no semiárido. Foram propostas as classes tróficas para esse novo IET, com suas respectivas expressões e faixas de estado trófico, posteriormente comparadas com outras classificações já existentes. Análises estatísticas, como PCA e coeficiente de Spearman, ajudaram a compreender as correlações entre variáveis. O novo Índice de Estado Trófico proposto foi elaborado combinando parâmetros tradicionais e novos, mostrando resultados consistentes com a situação específica dos reservatórios em estudo, além

de resultados similares na determinação do estado trófico dos reservatórios estudados (ao comparar com índices já estabelecidos), sugerindo que o novo IET pode ser utilizado no monitoramento dos reservatórios estaduais.

Palavras-chave: nível trófico; reservatórios cearenses; monitoramento; correlação.

ABSTRACT

The widespread use of water in human life makes its quality necessary, aiming for the well-being of the population, fauna and flora. Natural or artificial reservoirs are great sources of water storage, widely used for supply and irrigation. A recent study states that reservoir waters will still be essential for the next 30 years, due to the expected increase in demand. In reservoirs in the semi-arid region, aspects of non-quality of these waters are observed, both due to quality standard reference values indicated by CONAMA, and resulting from the evaluation of indices, such as IET and IQA. With these characteristics, the Brazilian Semi-arid region has a non-abundant amount of water in its reservoirs and with low quality in several points. To assist in decision-making on appropriate initiatives to resolve this problem, this work sought to develop a new IET taking into account data and reservoir conditions in the semi-arid region of Ceará, evaluating 18 parameters through standard procedures and the correlations between them. The data was made available by COGERH, in the years 2014 – 2022, for 25 reservoirs managed by the company. Descriptive statistics were performed for each set of parameter data, removing outlier values to evaluate their variation trends in the reservoirs. An exploratory study was also carried out, studying correlations for parameters versus transparency, in order to build the proposed index, with appropriate adaptations to Carlson's (1977) expressions. The parameters analyzed had high variability in their measurements, with the occurrence of extremely high values in some parameters, such as cyanobacteria counts, even being in disagreement with a federal resolution. In the data collection carried out, the maximum transparency measurement observed in the Pentecoste reservoir was selected to guide the adaptations in Carlson's expressions (1977). Phosphorus was identified as the main limiting nutrient in 80% of the reservoirs. The parameters total phosphorus, total nitrogen, chlorophyll a and turbidity presented the most significant correlations (greater than 0.4) for the composition of the new proposed IET. An adaptation was made to the base expression of the IET, to be associated with values obtained in the semi-arid region. Trophic classes were proposed for this new IET, with their respective expressions and trophic state ranges, subsequently compared with other existing classifications. Statistical analyses, such as PCA and Spearman coefficient, helped to understand the correlations between variables. The proposed new Trophic State Index was created combining traditional and new parameters, showing results consistent with the specific situation of the reservoirs under study, in addition to similar results in determining the trophic

state of the reservoirs studied (when comparing with already established indices), suggesting that the new IET can be used to monitor state reservoirs.

Keywords: trophic level; Ceará reservoirs; monitoring; correlation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa de delimitação da região semiárida brasileira	22
Figura 2 –	Bacias Hidrográficas do Estado do Ceará.....	25
Figura 3 –	Histórico do volume armazenado nos reservatórios monitorados do Ceará.....	26
Figura 4 –	Mapa do Estado do Ceará (com destaque para os reservatórios selecionados).....	41
Figura 5 –	Precipitação total das bacias hidrográficas cearenses: (a) no período chuvoso; (b) no período seco.....	43
Figura 6 –	Fluxograma de etapas para expressão-base do IET(DS).....	48
Figura 7 –	Variação de nitrogênio total (NT) nos reservatórios estudados.....	49
Figura 8 –	Variação de fósforo total (PT) nos reservatórios estudados.....	50
Figura 9 –	Variação da relação entre nitrogênio e fósforo (N:P) no período chuvoso.....	52
Figura 10 –	Variação da relação entre nitrogênio e fósforo (N:P) no período seco.....	52
Figura 11 –	Variação da transparência da água (DS) nos reservatórios estudados.....	54
Figura 12 –	Variação de turbidez nos reservatórios estudados.....	55
Figura 13 –	Variação da cor verdadeira nos reservatórios estudados.....	56
Figura 14 –	Variação de clorofila <i>a</i> nos reservatórios estudados.....	57
Figura 15 –	Variação da contagem de cianobactérias nos reservatórios estudados.....	59
Figura 16 –	Variação de oxigênio dissolvido (OD) nos reservatórios estudados.....	60
Figura 17 –	Variação dos parâmetros: (a) alcalinidade; (b) pH.....	61
Figura 18 –	Variação da temperatura nos reservatórios estudados.....	62
Figura 19 –	Variação dos parâmetros: (a) sólidos dissolvidos totais; (b) condutividade elétrica.....	63
Figura 20 –	Variação dos parâmetros: (a) cálcio; (b) ferro; (c) magnésio; (d) sódio.....	64
Figura 21 –	Variação do cloreto nos reservatórios estudados.....	66
Figura 22 –	Gráfico de loadings (variáveis) para os dados.....	67
Figura 23 –	Gráfico biplot (amostras e variáveis) para os dados.....	68
Figura 24 –	Matriz de correlação (<i>heat-map</i>) para os parâmetros.....	70
Figura 25 –	Fluxograma de etapas para construção do IET(DS).....	72
Figura 26 –	Correlação entre nitrogênio total (NT) e transparência (DS).....	73
Figura 27 –	Correlação entre fósforo total (PT) e transparência (DS).....	74

Figura 28 –	Correlação entre clorofila <i>a</i> (CHL) e transparência (DS).....	75
Figura 29 –	Correlação entre turbidez (TURB) e transparência (DS).....	76
Figura 30 –	Correlação entre ferro e transparência (DS).....	77
Figura 31 –	Classificação trófica dos reservatórios estudados (em 2015.1), segundo IET proposto por: (a) Toledo Jr; (b) Lamparelli; (c) Cunha; (d) este trabalho.....	82
Figura 32 –	Classificação trófica dos reservatórios estudados (em 2015.2), segundo IET proposto por: (a) Toledo Jr; (b) Lamparelli; (c) Cunha; (d) este trabalho.....	83
Figura 33 –	Classificação trófica dos reservatórios estudados (em 2018.1), segundo IET proposto por: (a) Toledo Jr; (b) Lamparelli; (c) Cunha; (d) este trabalho.....	84
Figura 34 –	Classificação trófica dos reservatórios estudados (em 2018.2), segundo IET proposto por: (a) Toledo Jr; (b) Lamparelli; (c) Cunha; (d) este trabalho.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Equações do IET para os diferentes autores.....	29
Tabela 2 –	Informações dos reservatórios selecionados.....	42
Tabela 3 –	Parâmetros avaliados, com respectivas unidades e métodos de análise...	44
Tabela 4 –	Classificação da “força” de correlação dos parâmetros.....	47
Tabela 5 –	Dados de estatística descritiva para os íons metálicos.....	65
Tabela 6 –	Proposta de classificação do IET e valores de referência de cada parâmetro.....	78
Tabela 7 –	Estados tróficos e respectivas características nos corpos hídricos.....	79
Tabela 8 –	Faixas de concentração dos parâmetros e do IET médio em cada modelo	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APHA	Associação Americana de Saúde Pública (do inglês American Public Health Association)
Art.	Artigo
ASA	Articulação Semiárido Brasileiro
ATP	Adenosina Trifosfato
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CHL	Clorofila
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONC.	Concentração
CV	Coefficiente de Variação
DS	Disco de Secchi
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia
hiper	Hipereutrófico
IB	Índice de Balneabilidade
IET	Índice de Estado Trófico
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IQA	Índice de Qualidade de Água
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
ln	Logaritmo Neperiano
MÁX.	Máximo

meso	Mesotrófico
N	Nitrogênio
NT	Nitrogênio Total
OD	Oxigênio Dissolvido
oligo	Oligotrófico
P	Fósforo
PC	Componente Principal (do inglês Principal Component)
PCA	Análise de Componente Principal (do inglês Principal Component Analysis)
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Recursos Hídricos
PT	Fósforo Total
rs	Coefficiente de Correlação de Spearman
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
super	Supereutrófico
TURB	Turbidez
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
VMP	Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Semiárido brasileiro	21
3.2	Recursos hídricos do Ceará	24
3.3	Eutrofização e índice de estado trófico	27
3.4	Parâmetros físicos, químicos e biológicos	30
3.4.1	<i>Nitrogênio</i>	30
3.4.2	<i>Fósforo</i>	31
3.4.2.1	<i>Nutriente limitante (relação N:P)</i>	32
3.4.3	<i>Transparência</i>	32
3.4.4	<i>Turbidez</i>	33
3.4.5	<i>Cor</i>	34
3.4.6	<i>Clorofila</i>	34
3.4.7	<i>Cianobactérias</i>	35
3.4.8	<i>Oxigênio dissolvido</i>	35
3.4.9	<i>Alcalinidade</i>	36
3.4.10	<i>pH</i>	37
3.4.11	<i>Temperatura</i>	37
3.4.12	<i>Ferro</i>	37
3.4.13	<i>Sódio, magnésio, cálcio</i>	38
3.4.14	<i>Cloreto</i>	38
3.4.15	<i>Sólidos dissolvidos totais</i>	39
3.4.16	<i>Condutividade</i>	39
4	METODOLOGIA	41
4.1	Descrição da área de estudo	41
4.2	Coleta das amostras e análise dos parâmetros	44
4.3	Ferramentas estatísticas e tratamento multivariada	46
4.4	Construção do Índice de Estado Trófico	47

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos	49
5.1.1	<i>Nitrogênio total e fósforo total</i>	49
5.1.2	<i>Transparência, turbidez e cor</i>	54
5.1.3	<i>Clorofila a, contagem de cianobactérias e oxigênio dissolvido</i>	57
5.1.4	<i>Alcalinidade, pH e temperatura</i>	61
5.1.5	<i>Sólidos dissolvidos totais e condutividade elétrica</i>	63
5.1.6	<i>Íons metálicos e cloreto</i>	64
5.2	Correlação entre os parâmetros e proposta de classificação trófica	67
5.2.1	<i>Avaliação multivariada dos dados – Análise de Componentes Principais</i>	67
5.2.2	<i>Correlação multiparamétrica</i>	69
5.2.3	<i>Transparência e IET</i>	71
5.2.3.1	<i>Correlação transparência e nitrogênio total</i>	73
5.2.3.2	<i>Correlação transparência e fósforo total</i>	74
5.2.3.3	<i>Correlação transparência e clorofila a</i>	75
5.2.3.4	<i>Correlação transparência e turbidez</i>	76
5.2.3.5	<i>Correlação transparência e ferro</i>	77
5.2.4	<i>Expressões na composição do novo IET</i>	77
5.3	Comparação entre diferentes IET e o proposto nesta pesquisa	80
6	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A – DADOS PARA ELABORAÇÃO DOS MAPAS COM CLASSIFICAÇÃO TRÓFICA EM 2015	98
	APÊNDICE B – DADOS PARA ELABORAÇÃO DOS MAPAS COM CLASSIFICAÇÃO TRÓFICA EM 2018	100

1 INTRODUÇÃO

As primeiras civilizações surgiram nas proximidades de corpos d'água (principalmente água doce), apresentando-se como um recurso essencial para o desenvolvimento e sobrevivência da vida humana, utilizada até os dias atuais na dessedentação, transporte, lazer e geração de energia.

A qualidade das águas é de suma importância, pois dependendo das condições físicas, químicas e biológicas, pode não ser adequada para os mais diversos usos em atividades residenciais, comerciais e industriais.

O Semiárido brasileiro apresenta, além de aspectos negativos na qualidade de suas águas, a problemática de quantidade de água disponível para uso. Barbosa *et al.* (2012) elencaram algumas das condições que os reservatórios do Semiárido estão sujeitos: altas temperaturas, baixa vazão, alto tempo de residência de água e balanço hídrico negativo. Para esses autores tais condições tornam esses sistemas mais suscetíveis à eutrofização quando comparados com reservatórios de áreas úmidas. Andrade *et al.* (2020) salientam que além destas condições climáticas, as ações antrópicas também contribuem para o processo de eutrofização no Semiárido brasileiro. Devido às características da região Semiárida, a conservação e o manejo dos seus sistemas aquáticos são ainda mais fundamentais (Barbosa *et al.*, 2012).

O processo de açudagem se tornou frequente devido a necessidade de ter reservas hídricas para abastecimento residencial e industrial, em períodos de estiagem (Araújo, 2012). Os reservatórios permanecerão com importância no abastecimento estadual por mais 30 anos, frisando a necessidade de manter ou tornar esses reservatórios em condições de boa qualidade para diversas funções na sociedade (Rabelo, 2017)

Por estudos realizados no Semiárido, observa-se a frequente classificação das águas dos reservatórios como eutrófico/hipereutrófico, muitas vezes decorrente das elevadas concentrações de nutrientes naquelas águas (Cavalcante *et al.*, 2019; Rolim, 2016; Santos *et al.*, 2020; Silva, 2018). Algumas consequências da eutrofização são: problemas estéticos, aumento do custo do tratamento da água, alteração na quantidade e qualidade de peixes para consumo, redução da navegabilidade e progressivo desaparecimento do corpo hídrico (Von Sperling, 2014).

Os diversos modelos de avaliação do estado trófico de rios e reservatórios apresentam diferentes expressões, compostas por correlações entre parâmetros físicos, químicos e biológicos. As concentrações de fósforo total (PT) e clorofila *a* (CHL) são os

principais indicadores nesses estudos (Carlson, 1977; Cunha *et al.*, 2013; Rolim, 2016; Toledo Jr., 1990).

Por diferenças metodológicas entre as pesquisas citadas, acredita-se que um único modelo de estado trófico pode não ser representativo das condições para outros corpos d'água de onde não foram originalmente elaborados. Torna-se importante também avaliar a existência de outros fatores relevantes na determinação do índice de estado trófico, como medidas de pH, oxigênio dissolvido e contagem de cianobactérias na água.

A variabilidade de volume nos reservatórios cearenses, decorrente da influência das características típicas de região semiárida, pode estar também associado com a ocorrência de valores de nutrientes diferentes de estudos em regiões de clima temperado e subtropical.

No intuito de alcançar níveis de qualidade para os açudes do Estado do Ceará, uma avaliação contínua, com processos e estudos condizentes com as condições locais se torna necessária para favorecer a implementação de políticas públicas e ambientais visando essa melhora da qualidade hídrica.

Diante da problemática apresentada, este trabalho possui como hipóteses:

- A atual classificação trófica não é condizente com a situação dos reservatórios desta região;
- Há outros parâmetros relevantes na elaboração do Índice de Estado Trófico no semiárido.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Propor um Índice de Estado Trófico (IET) a partir de dados limnológicos de reservatórios do Semiárido cearense.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar levantamento bibliográfico e análise dos dados físicos e químicos dos reservatórios selecionados durante o período de 2014 a 2022;
- Determinar a relação de nutriente limitante para os reservatórios e a tendência geral desta relação;
- Realizar estudo de correlação, por meio de ferramentas quimiométricas, entre as variáveis para elaboração do IET;
- Desenvolver uma nova classificação trófica, com base nos dados de análise de água fornecidos pela COGERH;
- Comparar a nova proposta do IET com outras já desenvolvidas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Semiárido brasileiro

O Semiárido brasileiro é caracterizado por ser uma região com alta vulnerabilidade climática, com secas intensas e frequentes. O regime de chuvas é irregular, com acentuada variabilidade espaço-temporal e baixos valores médios de precipitação pluviométrica (Moura *et al.*, 2019). Além disso, é frequente a ocorrência de veranicos, ou seja, períodos de seca durante o período chuvoso (Alvalá *et al.*, 2019).

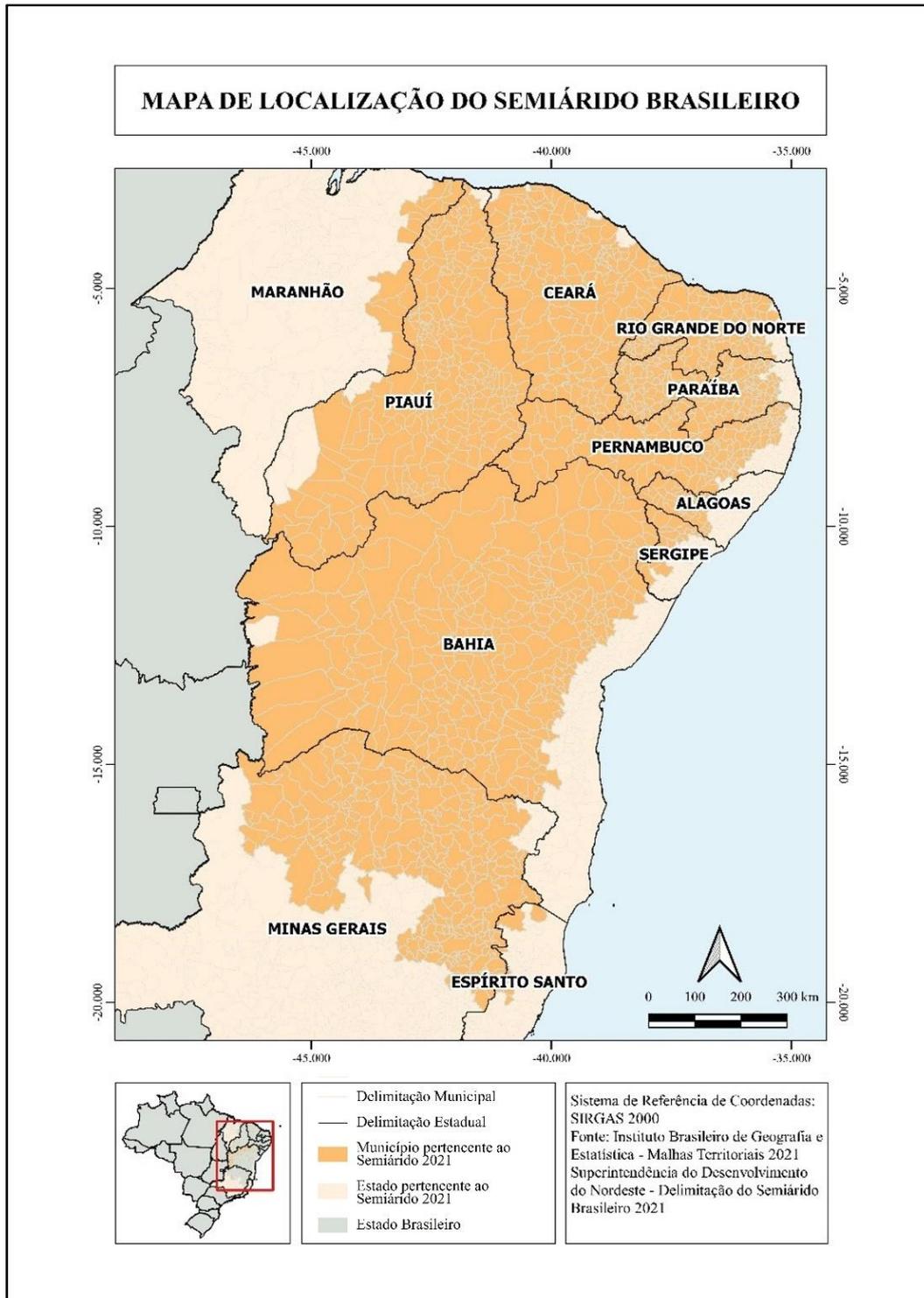
As principais características climáticas são: temperaturas médias anuais elevadas, com valores na faixa de 24°C a 28°C; taxa de evaporação entre 1200 e 3200 mm/ano e precipitação média anual inferior a 800 mm (Moura *et al.*, 2019). Tais características resultam em um déficit hídrico na maior parte do ano e perda expressiva na disponibilidade hídrica na região. A estação chuvosa ocorre no primeiro semestre entre os meses de fevereiro e maio, na maior parte do Semiárido, já a estação seca ocorre entre os meses de agosto e outubro (Marengo *et al.*, 2011).

A região representa aproximadamente 13% do território do país, abrangendo 1427 municípios pertencentes aos estados do Nordeste e aos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Essa delimitação do Semiárido brasileiro foi definida segundo a Resolução 150/2021 da Superintendência do Desenvolvimento Regional (SUDENE), que estabeleceu os seguintes critérios:

- I – Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm;
- II – Índice de Aridez de Thorntwaite igual ou inferior a 0,50;
- III – Percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (SUDENE, 2021, p. 13).

É necessário que pelo menos um dos critérios elencados seja alcançado, em qualquer parte do território do município, para que este seja incluído como pertencente a região do Semiárido (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de delimitação da região semiárida brasileira



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Caatinga é o ecossistema predominante no Semiárido e o único bioma restrito ao território brasileiro, sendo um ecossistema rico em biodiversidade e com um registro considerável de espécies endêmicas, segundo Tabarelli *et al.* (2018).

Em relação aos aspectos geológicos, predominam-se rochas de embasamento cristalino, com a formação de solos rasos, acarretando uma baixa capacidade de infiltração (Zanella, 2014). As condições climáticas da região e a estrutura geológica dominante refletem na hidrografia. No Semiárido Brasileiro a maior parte dos rios são intermitentes em pelo menos um de seus trechos, permanecendo com o leito do rio seco durante um período (Silva; Duarte, 2017).

A escassez e disponibilidade hídrica impõem obstáculos ao desenvolvimento econômico e social, principalmente das regiões semiáridas (Dalezios; Angelakis; Eslamian, 2018). Para esses autores a causa da escassez hídrica pode ser além de física/climática, podendo ter aspectos institucionais e socioeconômicos.

Para possibilitar a convivência da população em períodos de seca, em decorrência da escassez hídrica, políticas públicas precisaram ser adotadas. Portanto, políticas de construção de reservatórios artificiais foram implementadas ao longo do tempo (Campos, 2015). Os açudes desempenham uma importante função na potencialização dos recursos hídricos da região, pois, segundo Araújo (2012), são estruturas de reservas hidráulicas formadas pelo barramento de cursos d'água que recebem o excedente hídrico no período chuvoso e armazenam para a disponibilização de água em períodos secos subsequentes.

De modo geral, os reservatórios superficiais são vulneráveis à redução da quantidade e qualidade de sua água armazenada em decorrência de uma série de processos. Paulino e Teixeira (2012) indicam que o regime hidrológico (trinômio chuva-evaporação-frequência de vertimento) tem influência de forma direta nas condições das águas represadas.

A qualidade da água sofre influências antropogênicas, biogeoquímicas, hidrológicas e da variabilidade climática, em escalas temporais e espaciais (Mosley, 2015). Temporalmente a qualidade da água relaciona-se ao regime hidrológico, já espacialmente associa-se com o tipo e uso e ocupação do solo (Paulino; Teixeira, 2012).

No Semiárido a disponibilidade hídrica dos principais reservatórios oscila entre 20 e 50% da vazão afluyente, sendo a vazão não regularizada (80 a 50%) evaporada e/ou vertida (Araújo, 2012).

Os açudes representam a principal fonte de abastecimento das cidades do Semiárido (ASA, 2019). No entanto, em períodos extensos de estiagem ocorre a depleção do nível de água dos reservatórios causados pelas condições climáticas e pelo aumento da demanda hídrica pela população. A redução significativa dos volumes dos reservatórios, também apresenta como consequência problemas na qualidade da água (Gondim *et al.*, 2017). Essas mudanças consideráveis dos níveis dos reservatórios acarretam em alterações das condições físicas e

químicas como a disponibilidade de luz, regime de mistura e concentração de nutrientes (Braga *et al.*, 2015).

Um estudo recente realizado por Wiegand *et al.* (2021) investigou a mudança no estado trófico de alguns reservatórios do Nordeste em função da variabilidade hidro climática. Os resultados obtidos por esses pesquisadores apontam que a seca e o uso do solo exercem efeitos relevantes no estado trófico dos reservatórios da região.

3.2 Recursos hídricos do Ceará

O Ceará pertence ao Semiárido brasileiro, com 95% dos municípios do estado inseridos na região. A Política de Recursos Hídricos do Ceará foi influenciada diretamente pelos ciclos de seca, que estimularam a adoção de estratégias governamentais, como a ampliação de infraestrutura hídrica, desenvolvimento de instrumentos de gestão e criação de instituições (CEARÁ, 2018).

O estado é reconhecido pelo pioneirismo no segmento dos recursos hídricos. A Política Estadual de Recursos Hídricos do estado foi instituída pela Lei Estadual nº 11.996/1992 (CEARÁ, 1992), antes da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRS) - Lei Federal nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997). Em 2010 a referida política estadual foi atualizada pela Lei Estadual nº 14.844/2010, incluindo o enquadramento dos corpos de água em classes de uso preponderante e a fiscalização de recursos hídricos como instrumentos, dentre outras alterações (CEARÁ, 2010).

O gerenciamento dos recursos hídricos no Estado do Ceará é função da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH). A Companhia gerencia de forma descentralizada, participativa e integrada a oferta de água subterrânea e superficial de domínio do Estado. A atuação da COGERH compreende a manutenção da infraestrutura hídrica, cobrança pelo uso da água, assessoria aos Comitês de Bacia e Comissões Gestoras de Sistemas Hídricos, elaboração de planos e estudos relacionados à gestão dos recursos hídricos, monitoramento quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos, dentre outros.

O Ceará atualmente está dividido em 12 Bacias Hidrográficas (Figura 2), segundo o Plano Estadual dos Recursos Hídricos. Estão distribuídos nestas bacias 157 reservatórios estratégicos que juntos concentram uma capacidade de reserva de aproximadamente 18,6 bilhões de m³, sendo estes reservatórios monitorados pela COGERH. Em termos de água subterrânea, o estado apresenta baixo potencial hídrico devido ao domínio cristalino (cerca de 70% do território) que influencia diretamente na quantidade e qualidade dos aquíferos.

Figura 2 – Bacias Hidrográficas do Estado do Ceará

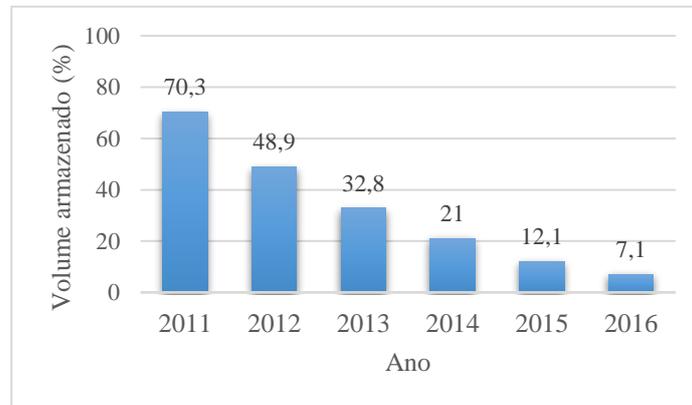


Fonte: IPECE (2020).

O estado passou por um período de seca prolongada entre os anos de 2012 e 2016, seca esta que atingiu vários estados da região semiárida, sendo considerada uma das mais longas e intensas das últimas décadas (Marengo *et al.*, 2018). Os impactos desta seca influenciaram

diretamente no aporte hídrico dos reservatórios, que diminuiram consideravelmente o volume armazenado, como pode ser observado na Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Histórico do volume armazenado nos reservatórios monitorados do Ceará



Fonte: Portal Hidrológico do Ceará (2021 - adaptado)

Esse período de 5 anos de seca no Estado evidenciou a necessidade da consolidação de uma abordagem fundamentada na gestão de risco e no planejamento contínuo para a preparação para secas extremas, demonstrando que as soluções implementadas até então são insuficientes para suportar longos períodos de escassez hídrica (CEARÁ, 2018). Desta forma a Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará, juntamente com seus órgãos vinculados elaboraram o Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará em 2018, planejando a ampliação da capacidade de preservação hídrica com a ampliação da rede de açudagem existente e implantação de reservatórios estratégicos em regiões de potencial hidrológico ainda não aproveitado.

Singh (2017) aponta que a segurança hídrica tem dimensões espaciais e temporais e é fundamentada em quatro aspectos: i) conhecimento da qualidade da água e do tratamento; ii) existência de instalações e recursos para o acesso em boa qualidade e quantidade; iii) fornecimento consistente de água em qualidade e quantidade e iv) identificação e desenvolvimento dos recursos hídricos.

Rabelo (2017) analisou a segurança hídrica no Ceará por meio de uma análise da oferta e da demanda hídrica do estado em um horizonte de estudo até 2050. Os resultados obtidos por meio de projeções apresentam que a demanda hídrica total do estado, considerando abastecimento humano, dessedentação animal, indústria, turismo e irrigação será de 4,49 bilhões de metros cúbicos em 2050. Já a oferta hídrica total do estado, considerando reservatórios, água subterrânea, transposição do Rio São Francisco e dessalinização da água do mar será de 4,21 bilhões de metros cúbicos, sendo os reservatórios responsáveis por

aproximadamente 50% dessa oferta. De acordo com o estudo, os reservatórios permanecerão como grandes responsáveis pela manutenção hídrica até 2050 (Rabelo, 2017).

Nos períodos secos, tem-se observado uma redução da qualidade hídricas nos reservatórios, se tornando uma pauta frequente nas políticas de água, já que ocasiona impactos a sociedade, especialmente no abastecimento humano (Souza Filho, 2018).

O Ceará conta desde 1998 com uma rede de monitoramento da qualidade da água sendo gerida pela COGERH. Os objetivos deste monitoramento incluem o acompanhamento da evolução da qualidade dos principais corpos hídricos, o diagnóstico dos reservatórios, cálculo dos índices de qualidade de água, realização de estudos e fornecimento de informações. O monitoramento qualitativo no estado tem demonstrado que há predomínio de reservatórios eutrofizados (classificação como eutróficos e hipereutróficos), sendo este fenômeno considerado intrínseco às características ambientais do Semiárido (COGERH, 2018).

3.3 Eutrofização e índice de estado trófico

A eutrofização é um processo ocorrido em corpos hídricos associado a produtividade das espécies presentes nesse corpo d'água. Elevados valores de nutrientes nas águas (principalmente nitrogênio e fósforo) favorecem a ocorrência desse fenômeno. O processo de eutrofização é natural nos corpos d'água, ocorrendo em todos reservatórios, apresentando piores condições tróficas em longos anos até o seu desaparecimento, em decorrência do assoreamento (Lamparelli, 2004). No entanto, as diversas ações humanas nestes corpos hídricos e nos seus entornos acarretam a aceleração da eutrofização, decorrente da disponibilidade excessiva de nutrientes num ritmo maior que o corpo hídrico consegue assimilar (Silva, 2018).

Entre essas ações, destacam-se os despejos industriais e residenciais, além da larga utilização de fertilizantes e agrotóxicos a base de nitrogênio e fósforo (Perez; Restrepo, 2008). As principais características de ambientes eutrofizados são: mortandade de peixes, alteração na coloração e no odor das águas, elevada proliferação de plantas aquáticas, redução da transparência e redução da biodiversidade (Glibert *et al.*, 2010; Smith; Schindler, 2009; Tundisi *et al.*, 2006), sendo as características mais facilmente perceptíveis pelos sentidos humanos (visão, olfato e paladar), gerando recusa na utilização destas águas. Os diversos usos possíveis para essas águas ficam comprometidas, como recreação, abastecimento industrial e residencial, navegação e apreciação natural do ambiente (Von Sperling, 2014; Xavier, 2005).

Importante salientar que na elevada atividade microbiológica nas águas, pode ocorrer floração de cianobactérias (Carvalho *et al.*, 2006; Environment Agency, 1998). Entre os diversos malefícios associado a essas toxinas, são relatados efeitos dermatotóxicos, neurotóxicos, hepatotóxico (Mankiewicz *et al.*, 2003; Panosso *et al.*, 2007; Salmaso *et al.*, 2016).

No intuito de avaliar os aspectos de qualidade dos corpos hídricos, foram realizados diversos estudos e formas de medir a qualidade das águas, como Índice de Balneabilidade (IB), Índice de Qualidade de Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET), para auxiliar a tomada de decisão e as iniciativas na busca de preservar/melhorar a qualidade destas águas.

A elaboração de índices, e em particular o Índice de Estado Trófico, apresenta como praticidade a avaliação da situação de rios e reservatórios, por meio da medida de alguns parâmetros que estão associados com a produtividade microbiológica e presença de nutrientes, facilitando também a compreensão dos aspectos qualitativos dos corpos hídricos por especialistas e leigos.

Historicamente, um dos primeiros e mais citados índices foi proposto por Carlson (1977), levando em consideração dados de transparência, fósforo total e clorofila *a* coletados por diversos pesquisadores da época, em regiões de clima temperado. Correlações entre esses parâmetros foram realizadas, para compor as expressões que definem o estado trófico das águas. Segundo este estudo, não era proposto uma classificação nominal para a situação trófica das águas, apenas uma classificação numérica: quanto mais próximo de 100, pior o estado trófico daquele lago.

Com passar dos anos, outros estudos foram realizados, com adaptações a partir do estudo de Carlson (1977). Toledo Jr. (1990) apresentou novas expressões na determinação do IET, com resultados obtidos em região de clima tropical. Diferente de Carlson, no trabalho de Toledo Jr. (1990) existe uma classificação nominal para os estados tróficos (oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico). Salas e Martino (1991) também realizaram estudos em lagos tropicais da América Latina e afirmam a necessidade de adaptar as expressões que correlacionam os parâmetros decorrentes dos diferentes ambientes de estudo.

Utilizando dados disponibilizados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Lamparelli (2004) obteve novas expressões em região de clima subtropical. O novo IET foi proposto para rios e reservatórios, com dados coletados de 1996 a 2001, sendo utilizado atualmente pela CETESB no monitoramento destes corpos hídricos. Também com dados da CETESB, Cunha *et al.* (2013) propuseram o IET_{trs} (IET para reservatórios tropicais/subtropicais), com equações do IET semelhante as de Lamparelli, organizando o

conjunto de dados e dividindo as faixas de cada classe trófica segundo o percentil dos resultados (classe 1 = percentil 0-20%; classe 2 = percentil 20-40%; classe 3 = percentil 40-60%; classe 4 = percentil 60-80%; classe 5 = percentil 80-100%).

Apesar de serem utilizados os dados de transparência na elaboração das correlações e equações para o IET, ela não é aplicada na determinação do estado trófico das águas, sendo comumente utilizadas as equações em função do fósforo total (frequentemente associado ao nutriente limitante) e clorofila *a* (frequentemente associado a biomassa fitoplanctônica) (Barros, 2013; Feitosa, 2011; Salas; Martino, 1991; Silva, 2018; Wang *et al.*, 2008).

Diversos autores citam que o parâmetro transparência da água não deve ser utilizado na computação direta do Índice de Estado Trófico, devido a alguns fatores que afetam o adequado registro dessa medida, como: (a) variabilidade da composição do corpo hídrico (Kulshreshtha; Shanmugam, 2015); (b) fenômenos de absorção e espalhamento da radiação incidente na superfície (Effler *et al.*, 2017; Lind, 1986); (c) alteração da iluminação no ambiente e a capacidade de observação do analista (acuidade visual) na realização da medida (Effler, 1985; Preisendorfer, 1986).

As expressões elaboradas por esses pesquisadores estão compiladas na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações do IET para os diferentes autores

AUTORES	CONDIÇÃO CLIMÁTICA	EQUAÇÕES
Carlson (1977)	Clima Temperado	$IET(PT) = 10 \cdot \left\{ 6 - \left[\frac{\ln(48/PT)}{\ln 2} \right] \right\}$
		$IET(CHL) = 10 \cdot \left\{ 6 - \left[\frac{(2,04 - 0,68 \cdot \ln CHL)}{\ln 2} \right] \right\}$
		$IET(MÉDIO) = \frac{IET(PT) + IET(CHL)}{2}$
Toledo Jr. (1990)	Clima Tropical	$IET(PT) = 10 \cdot \left\{ 6 - \left[\frac{\ln(80,32/PT)}{\ln 2} \right] \right\}$
		$IET(CHL) = 10 \cdot \left\{ 6 - \left[\frac{(2,04 - 0,695 \cdot \ln CHL)}{\ln 2} \right] \right\}$
		$IET(MÉDIO) = \frac{IET(PT) + IET(CHL)}{2}$
Lamparelli (2004)	Clima Subtropical	$IET(PT) = 10 \cdot \left\{ 6 - \left[\frac{(1,77 - 0,42 \cdot \ln PT)}{\ln 2} \right] \right\}$
		$IET(CHL) = 10 \cdot \left\{ 6 - \left[\frac{(0,92 - 0,34 \cdot \ln CHL)}{\ln 2} \right] \right\}$

		$\text{IET}(\text{MÉDIO}) = \frac{\text{IET}(\text{PT}) + \text{IET}(\text{CHL})}{2}$
		$\text{IET}(\text{PT}) = 10 \cdot \left\{ 6 - \left[\frac{(1,33 - 0,28 \cdot \ln \text{PT})}{\ln 2} \right] \right\}$
Cunha <i>et al.</i>	Clima	$\text{IET}(\text{CHL}) = 10 \cdot \left\{ 6 - \left[\frac{(0,84 - 0,25 \cdot \ln \text{CHL})}{\ln 2} \right] \right\}$
(2013)	Tropical/Subtropical	
		$\text{IET}(\text{MÉDIO}) = \frac{\text{IET}(\text{PT}) + \text{IET}(\text{CHL})}{2}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Há estudos com dados de reservatórios do semiárido cearense, avaliando o estado trófico com as novas relações apresentadas nessas pesquisas (Barros, 2013; Lima, 2019; Rolim 2016). Esses trabalhos trazem informações relevantes nas correlações entre os parâmetros, contribuindo na compreensão dos aspectos físicos, químicos e biológicos da região, realizando adaptações na forma da determinação do estado trófico, como incluindo a utilização da contagem total de cianobactérias na elaboração do índice (Lima, 2019).

A busca por aperfeiçoamento da forma de avaliar o estado trófico de corpos d'água é defendido por Salas e Martino (2001), diante da diferença que o clima nas regiões em estudo pode exercer nos processos e equilíbrios físicos, químicos e biológicos no corpo hídrico. Souza *et al.* (2008) afirmam que os critérios de avaliação em regiões úmidas devem apresentar diferenças dos critérios avaliativos de eutrofização em regiões de clima semiárido.

Atualmente, a COGERH utiliza o IET proposto por Toledo Jr. (1990) no monitoramento da situação trófica dos 157 corpos hídricos administrados por ela. Na busca de avaliação e compreensão melhor dos reservatórios do semiárido, um IET baseado nos resultados desta região se torna importante.

3.4 Parâmetros físicos, químicos e biológicos

3.4.1 Nitrogênio

O nitrogênio é um dos elementos mais abundantes na biosfera, estando mais de 99% dele na forma de gás nitrogênio (N₂) na atmosfera (Enrich-Prast, 2005; Sawyer; McMarty; Parkin, 2002). É extremamente importante na composição das células dos seres vivos, além de outros componentes celulares como as proteínas.

Sua presença em corpos hídricos é oriunda de despejos domésticos, industriais e de fertilizantes (fontes antrópicas), enquanto o processo de fixação de nitrogênio atmosférico, precipitação (arraste de nitrogênio pela chuva) e decomposição orgânica na água são as principais fontes naturais.

Em seu ciclo biogeoquímico, o nitrogênio permeia pelos 3 compartimentos da biosfera: litosfera, hidrosfera e atmosfera. De modo sucinto, o nitrogênio atmosférico (N_2) é captado por alguns microrganismos, fazendo parte dos processos biológicos e ao fim, excretado na forma de amônia (NH_3). Nessa espécie, a amônia pode ser utilizada por alguns produtores primários ou ser oxidada nas espécies nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), sendo esta última a forma mais estável em água e de fácil assimilação por plantas, algas e bactérias. Tendo passado por diversos organismo, segundo a teia alimentar, retornar a natureza pela decomposição de produtores e consumidores e também por excretas, dando prosseguimento ao ciclo.

O nitrogênio na forma de nitrato (NO_3^-) é a espécie química mais encontrada devido a estabilidade da sua forma oxidada. A ocorrência de concentrações elevadas de nitrito e amônia (espécies não completamente oxidadas) sugerem a presença de fontes recentes de poluição ou ocorrência de processos anaeróbicos (Pohling, 2009).

3.4.2 Fósforo

É um dos elementos essenciais na composição de moléculas importantes dos seres vivos, como nos fosfolipídios (componentes das membranas celulares) e no ATP (molécula com grande carga energética) (Esteves, 2011). Em atividades comerciais, é amplamente utilizado em bebidas, panificação, cerâmicas, detergentes e fertilizantes (Pohling, 2009).

Em corpos hídricos, o fósforo é um importante nutriente para as atividades microbiológicas, sendo relatado em trabalhos como o principal nutriente em vários corpos hídricos (Batista *et al.*, 2012; Chorus; Bartran, 1999; Toledo Jr., 1990). O fósforo se faz presente de formas naturais (decomposição de organismo na água, composição do solo do corpo hídrico e excrementos de animais) e de formas antrópicas (despejos residenciais e fertilizantes com fósforo na composição).

As trocas no ciclo biogeoquímico do fósforo não são constituídas de equilíbrios com a atmosfera. Resumidamente, o intemperismo sofrido por rochas e solo torna disponível esse nutriente, sendo lixiviados até os corpos hídricos. Na água ele se torna presente nos microrganismos pelas atividades biológicas vitais, passando a outros organismos pela sequência

da teia alimentar do ambiente. Pela decomposição e excretas de animais, retorna ao ambiente e aos equilíbrios que ele compõe.

O fósforo se apresenta nas formas orgânicas e inorgânicas na água, sendo as espécies de ortofosfato (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-) as formas mais facilmente capturadas pelos microrganismos (Ferreira *et al.*, 2005). A presença dessas espécies varia de acordo com a pH do corpo hídrico em que se encontram.

3.4.2.1 Nutriente limitante (relação N:P)

Comumente relatados como nutrientes essenciais nas atividades microbiológicas em corpos d'água, a definição de nutriente limitante busca compreender qual nutriente, em quantidades mínimas, está associado com o crescimento dos microrganismos aquáticos.

Essa análise do nutriente limitante leva em consideração a composição química elementar da biomassa algal, apresentada por Redfield (1958). Segundo Redfield (1958), essa composição é de $\text{C}_{106}\text{H}_{118}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}$, indicando que, numa razão molar de nitrogênio e fósforo, valores superiores a 16 o fósforo é o nutriente limitante, enquanto para valores inferiores a 16 o nitrogênio é o limitante. Essa razão molar é obtida pela divisão da concentração obtida por sua massa molar ($\text{N} = 14 \text{ g mol}^{-1}$ e $\text{P} = 31 \text{ g mol}^{-1}$).

Outros estudos apresentaram diferentes valores base nessa delimitação do nutriente limitante. Toledo Jr. (1990) indicaram que a razão inferior a 5:1 (N:P) ocorre limitação por nitrogênio e a razão superior a 10:1, ocorre limitação por fósforo. Essa razão 10:1 também foi adotada por Lamparelli (2004). Paulino *et al.* (2013) consideraram a proporção 22:1 para que tenha limitação por fósforo e a proporção inferior a 10:1 para limitação por nitrogênio. Valores que estejam compreendidos entre 10 e 22 indicam possível colimitação pelos dois nutrientes na água.

Apesar da preocupação quanto a proporção dos nutrientes, outros fatores podem estar associados com a limitação do crescimento dos organismos, como temperatura, disponibilidade de luz na água e outros equilíbrios internos no corpo d'água (Paulino *et al.*, 2013; Salas; Martino, 1991; Smith; Joye; Howarth, 2006).

3.4.3 Transparência

A transparência é uma medida da penetração da luz solar no interior do corpo hídrico. Essa medida é realizada de forma simples, ao imergir na coluna d'água uma placa

circular (disco de Secchi – DS), dividida em 4 áreas pintadas de preto e branco intercalados. A medida é concluída no momento que não se percebe mais, pela sensibilidade do olho humano, o disco na água, registrando a profundidade alcançada.

Apesar de ser uma medida simples, pode sofrer influência da presença de materiais em suspensão ou dissolvidos e da reflexão da superfície da água (Macêdo, 2007; Matheus; Gianotti; Moraes, 1989). Mesmo com essas possíveis falhas na medição, permanece útil a realização desta análise, por auxiliar em estudos de atenuação de luz na água e definição de regiões de atividades fotossintéticas (zona eufótica) (Branco; Feitosa; Monte, 2002; Pereira; Galo; Velini, 2011).

A medida de transparência pode apresentar muita variabilidade, dependendo do local ou período de análise. No Ceará já foram registrados valores elevados de transparência, como 4,2 m (anos de estiagem) e 3,7 m (anos chuvosos), enquanto já atingiu mínimos de 0,05 m (estiagem) e 0,10 m (chuvoso) (Wiegand *et al.*, 2021).

3.4.4 Turbidez

A turbidez da água é a medida do grau de interferência à dispersão da luz, gerada pela presença de microrganismos e de partículas em suspensão, como detritos orgânicos e inorgânicos. Corpos hídricos situados em regiões de solos erosivos podem apresentar valores elevados de turbidez, visto que recebem o carreamento de partículas principalmente nos períodos chuvosos. O despejo de efluentes domésticos e/ou industriais também podem ocasionar a elevação de turbidez nas águas.

Carlson (2007) enfatiza que em corpos hídricos rasos, agitados pelo vento e em reservatórios a turbidez não-algal pode afetar as variáveis do índice proposto por ele, tendo em vista que geralmente este tipo de turbidez afeta transparência e fósforo total. Lima *et al.* (2015) apontam que o vento é um fator de perturbação que pode gerar alterações diretas na turbidez, principalmente para reservatórios de baixa profundidade, pois tem a capacidade de ressuspender camadas de sedimentos do leito.

Normalmente a turbidez é determinada pela utilização do turbidímetro e expressa em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT). O valor de turbidez para águas doces de classe 2 é de até 100 UNT, conforme o que determina a Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005).

3.4.5 Cor

A cor é um parâmetro físico e sua presença em corpos hídricos é resultante da presença de partículas de origem orgânica (ácidos fúlvicos e húmicos), mineral (compostos de ferro e manganês) e industrial (corantes e outros produtos químicos).

Há dois tipos de classificação, a cor verdadeira que é resultado da presença de substâncias dissolvidas e é determinada após a centrifugação ou filtração da amostra, e a cor aparente que resulta da presença de substâncias em suspensão, como algas, argilas e óxidos de ferro e manganês.

Normalmente a determinação deste parâmetro é feita a partir da comparação da amostra com um padrão de cobalto-platina. O valor máximo permitido de cor verdadeira para águas doces de classe 2 é de 75 mg Pt/L, conforme é estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005).

3.4.6 Clorofila

A clorofila é um pigmento natural extremamente importante em processos fotossintéticos de plantas e outros organismos. Está presente em todas as espécies que realizam fotossíntese dependente de O₂.

Ela corresponde a 1-2% do peso seco da matéria orgânica nas algas fitoplanctônicas. A determinação de clorofila *a* ocorre em várias pesquisas devido a frequente associação desta com a biomassa algal, facilitando a estimativa da biomassa no corpo hídrico (Barros, 2013; Gonzalez-Rodriguez *et al.*, 2017; Lima, 2019). Além da clorofila, outros pigmentos auxiliam na fotossíntese, como ficobilinas e carotenóides (Lawrenz; Fedewa; Richardson, 2011; Streit *et al.*, 2005), mas a contribuição destes pigmentos é inferior as da clorofila, sendo considerados pigmentos acessórios.

Devido a essa associação com a biomassa, a clorofila é frequentemente estudada nas correlações de índice de estado trófico, junto com outros parâmetros, na avaliação da situação trófica de águas (Barros, 2013; Carlson, 1977; Cunha *et al.*, 2013; Lamparelli, 2004; Lima, 2019; Toledo Jr., 1990).

Apesar da ampla utilização em estudos, a clorofila *a* é influenciada por diversos fatores, por ser um pigmento instável. Entre estes fatores, pode citar a luminosidade (do local de coleta e do local de análise), pH, temperatura e alterações enzimáticas (Streit *et al.*, 2005).

3.4.7 Cianobactérias

As cianobactérias são organismos fitoplanctônicos procarióticos, presentes em corpos hídricos. Sua presença em ambientes de água doce é mais notada devida a maior disponibilidade de nutrientes (comparada com ambientes de água salgada) para o crescimento das populações de cianobactérias (Chorus; Bartran, 1999).

A degradação da qualidade das águas tem gerado condições de desenvolvimento das cianobactérias em reservatórios. Há estudos no território brasileiro que abordam esse crescimento rápido e intenso desses organismos, denominado de floração (Bitencourt-Oliveira *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2006; Panosso *et al.*, 2007; Rolim, 2016).

Dependendo das espécies de cianobactérias presentes nos corpos hídricos, toxinas podem ser liberadas na água e, em certas quantidades, ocasionar malefícios a outros seres vivos.

Em Caruaru (Pernambuco), foram constatadas 52 mortes de pacientes em tratamento de hemodiálise, devido a presença de microcistinas (toxinas) na água utilizada no tratamento (Jochimsen *et al.*, 1998). De acordo com Portaria de Consolidação 05/2017 do Ministério da Saúde, as concentrações máximas permitidas para essas toxinas são: 1,0 µg L⁻¹ para microcistinas e 3,0 µg L⁻¹ para saxitoxinas (BRASIL, 2017).

Na literatura, diversos trabalhos citam as correlações entre clorofila *a* e cianobactérias, sendo o pigmento uma estimativa destes organismos na biomassa (Chaffin *et al.*, 2018; Izydorczyk *et al.*, 2009; Kutser, 2004; Pan *et al.*, 2013; Saluri; Kaldmäe; Tuvikene, 2019). No entanto, a quantidade deste pigmento nas cianobactérias pode ser bastante variável, em função da espécie, tamanho, idade do microrganismo, entre outros (Brient *et al.*, 2007; Paerl; Justic, 2013).

Alguns trabalhos têm relatado a medida de ficocianina (pigmento característico de cianobactérias) como um indicador melhor para cianobactérias que a clorofila *a* (Gregor; Marsalék; Sípková, 2007; Horváth *et al.*, 2013; Tsola *et al.*, 2018; Yacobi *et al.*, 2015).

3.4.8 Oxigênio dissolvido

Na forma de O₂, essa substância é uma das mais importantes para os seres vivos, essencial no processo de respiração e em outros metabolismos do corpo. A medida desse parâmetro representa a quantidade de oxigênio disponíveis para assimilação pelos organismos aquáticos.

A presença do oxigênio se dá pelo processo de fotossíntese, como produto secundário da reação e pela difusão do gás oxigênio na água. Essa difusão é influenciada pela temperatura: temperaturas mais elevadas geram menores quantidades de O₂ dissolvidos e vice-versa (Pohling, 2009). Durante um período de 24 horas, ocorre um dinamismo de entrada e saída de O₂ na água, sendo o turno da manhã com valores de oxigênio dissolvido (OD) maiores, devido a fotossíntese realizada (pela elevada disponibilidade luminosa) e no turno da noite, ocorre a redução dos valores OD, pelos processos respiratórios serem mais realizados que a fotossíntese (ANA, 2021; Pohling, 2009).

O oxigênio dissolvido é um indicativo de qualidade e poluição nos corpos hídricos, apresentando um maior peso na determinação do Índice de Qualidade da Água (IQA) (ANA, 2021). Baixos índices de concentração de OD podem indicar poluição na água e baixa qualidade. Valores muito baixos de O₂ impossibilita a respiração aeróbica, ocasionando a morte de várias espécies aquáticas.

3.4.9 Alcalinidade

Alcalinidade é o parâmetro que mede a capacidade de neutralização dos íons H⁺ em sistemas aquosos. Para corpos hídricos este parâmetro é relevante pois representa a resistência e estabilidade às variações de pH que podem ocorrer por fenômenos naturais ou por atividades antrópicas. Além disso, para os reservatórios que são utilizados para o abastecimento humano, a medida da alcalinidade torna-se fundamental para a determinação da dosagem dos produtos químicos utilizados ao longo do tratamento da água (FUNASA, 2014).

O valor numérico da alcalinidade é quantificado, principalmente, em termos de carbonato de cálcio (CaCO₃), representando o somatório das concentrações dos sais de ácido carbônico: carbonatos (CO₃²⁻), bicarbonatos (HCO₃⁻) e hidróxidos (OH⁻). Lenzi, Favero e Luchese (2014) salientam que essas são as principais espécies responsáveis pela alcalinidade em corpos hídricos naturais, outras espécies também podem contribuir como as derivadas dos ácidos sulfídrico e fosfórico.

Em ambientes aquáticos com altas taxas de eutrofização, a capacidade tampão do meio torna-se fundamental. Como salienta Esteves (2011), o processo fotossintético das macrófitas e algas tendem a elevar o pH do meio durante a assimilação do CO₂, no entanto, nos corpos hídricos com alta alcalinidade as variações de pH são reduzidas, mesmo com as altas taxas fotossintéticas.

3.4.10 pH

A medida de pH é uma análise simples, rápida e frequente em estudo de diversas áreas. O pH é um parâmetro indicativo do estado de acidez ou basicidade de soluções. Tendo como referência a escala de 0-14, à temperatura de 25 °C, valores inferiores a 7 indicam pH ácido no meio, valores superiores a 7 indicam pH alcalino e valor exatamente 7 indica neutralidade no meio.

Em águas de corpos hídricos, esse parâmetro possui grande relevância devido afetar a disponibilidade de certas espécies químicas na água, favorecendo ou restringindo a atividade biológicas de plantas e animais. Essa variação do pH nos corpos d'água pode ser decorrente da ocorrência de chuva ácida, da reação com rochas carbonatadas e dos despejos industriais e residenciais (Pohling, 2009).

As águas naturais apresentam valores de pH na faixa de 4 – 9, sendo geralmente encontradas em valores mais alcalinos, devido à presença de carbonatos e bicarbonatos (íons associados com alcalinidade) nas águas (APHA, 2017).

3.4.11 Temperatura

A temperatura é um parâmetro físico que exerce influência em uma série de parâmetros e propriedades físico-químicas da água, como densidade, tensão superficial e viscosidade. A temperatura da água tem ação direta sobre os organismos aquáticos, pois influencia os processos de produtividade primária, de decomposição de matéria orgânica, de crescimento e reprodução, além de influenciar os movimentos e correntes (Esteves, 2011).

O conhecimento da temperatura do corpo hídrico é fundamental para a realização da análise e interpretação de outros parâmetros, como oxigênio dissolvido, pH e condutividade elétrica.

3.4.12 Ferro

Em corpos aquáticos, os íons de ferro podem estar sob a forma reduzida ou oxidada e suas concentrações dependem de alguns fatores químicos e físicos, como pH, temperatura e potencial redox (Esteves, 2011). Em condições de baixa concentração de oxigênio, existe a prevalência do íon ferroso (Fe^{2+}), que tem solubilidade controlada pela concentração de

carbonato. Com o contato com oxigênio há a oxidação para o estado férrico (Fe^{3+}), podendo ser hidrolisado para formar óxido férrico hidratado que é insolúvel.

A concentração de íons de ferro na água é crucial na detecção de impactos antrópicos nos ecossistemas aquáticos, sendo utilizado para o enquadramento dos corpos d'água. A Resolução CONAMA 357/05 estabelece o valor de ferro dissolvido de até 3 mg/L para águas doces de classe 2 (BRASIL, 2005). Embora a presença desse elemento em águas naturais não provoque danos à saúde humana, sua presença pode conferir sabor metálico e provocar manchas em encanamentos e utensílios domésticos.

3.4.13 Sódio, magnésio e cálcio

O sódio, magnésio e cálcio são macronutrientes e exercem funções relevantes em ecossistemas aquáticos. Dentre as principais funções, Esteves (2011) destaca que o sódio é um dos responsáveis pelo transporte de íons para meios intra e extracelulares, o magnésio participa da formação da molécula de clorofila e de processos metabólicos, já o cálcio é fundamental para o crescimento de algas e de vários animais, além de interferir no pH do meio aquático e na ciclagem de outros elementos.

O sódio é bastante solúvel e encontrado de forma combinada, sendo o cloreto de sódio a forma mais abundante. Cálcio e magnésio possuem comportamento geoquímico semelhante (Pohling, 2009). Na água o magnésio se dissolve na forma de Mg^{2+} , sendo normalmente associado ao bicarbonato. O cálcio é oriundo principalmente de minerais a base de carbonato de cálcio, que se tornam solúveis em água na presença de gás carbônico dissolvido.

Os cátions de sódio, magnésio e cálcio são um dos principais íons responsáveis pela origem da salinidade em corpos hídricos. Além disso, a presença dos cátions de magnésio e cálcio é frequentemente associada à dureza das águas.

3.4.14 Cloreto

O íon cloreto é o ânion inorgânico mais presente nas águas (Pohling, 2009), e normalmente está disseminado na forma de sais de sódio, potássio e cálcio. A ocorrência de cloretos na água pode ser ocasionada por infiltração de águas marinhas, dissolução dos minerais de rochas, contaminação por efluentes industriais, dentre outros.

A alta concentração de íons de cloreto comumente é associada à salinidade dos corpos hídricos, e pode ocasionar danos em tubulações metálicas e problemas para a irrigação. A Resolução CONAMA 357/05 estabelece o valor máximo de 250 mg/L para o parâmetro cloreto total em águas doces de classe 2 (BRASIL, 2005).

3.4.15 Sólidos dissolvidos totais

O termo sólido em estudos hidrológicos refere-se a diversos materiais (em suspensão ou dissolvidos) numa solução. A porção de água obtida que contém sólidos, após um processo de filtração (poros de filtração de 2,0 µm ou menor) é denominada de porção dissolvida, pois tem a presença de sólidos dissolvidos (APHA, 2017).

A composição dos sólidos dissolvidos totais (SDT) é variada, contendo íons, moléculas inorgânicas e orgânicas (com boa solubilidade), acarretando coloração à água, em alguns casos. Esses sólidos dissolvidos são de origem natural do corpo hídrico, característico dos solos que o compõem ou de origem externa, como efluentes industriais, processos de mineração nas proximidades ou inserção de água salgada no ambiente (Weber-Scannell; Duffy, 2007).

Os SDT são importantes para manutenção das atividades biológicas em água, mas o excesso de algumas espécies dissolvidas pode reduzir a penetração de luz na água, influenciando nos processos de fotossíntese. A presença de grandes quantidades de sólidos dissolvidos pode tornar a água desagradável para consumo, pela sensação que gera no paladar (APHA, 2017). Também pode ser prejudicial em águas para irrigação, devido a salinidade associada a esses sólidos (Lima, 2019).

3.4.16 Condutividade

A capacidade de uma solução de transmitir corrente elétrica em função da concentração de íons é conhecida como condutividade elétrica. Dessa forma, há maior ação eletrolítica em soluções de maior concentração iônica.

Esteves (2011) aponta que no estudo das extensões de água doce, a condutividade elétrica da água é uma das variáveis mais importantes pois sua medida pode trazer informações cruciais sobre o metabolismo do ecossistema aquático, tais como: a magnitude da concentração

iônica, a produção primária e a decomposição da matéria orgânica a partir da variação diária, a detecção de fontes poluidoras nos corpos hídricos e diferenças geoquímicas nos afluentes.

Este parâmetro pode ser medido com o uso de condutímetros, devendo ser ajustado à temperatura da água durante o procedimento de análise, tendo em vista que os valores da condutividade variam consideravelmente com a temperatura da água. O pH da amostra também pode exercer influência, principalmente em amostras com valores de pH nas faixas extremas, devido a elevada concentração de íons H^+ e OH^- .

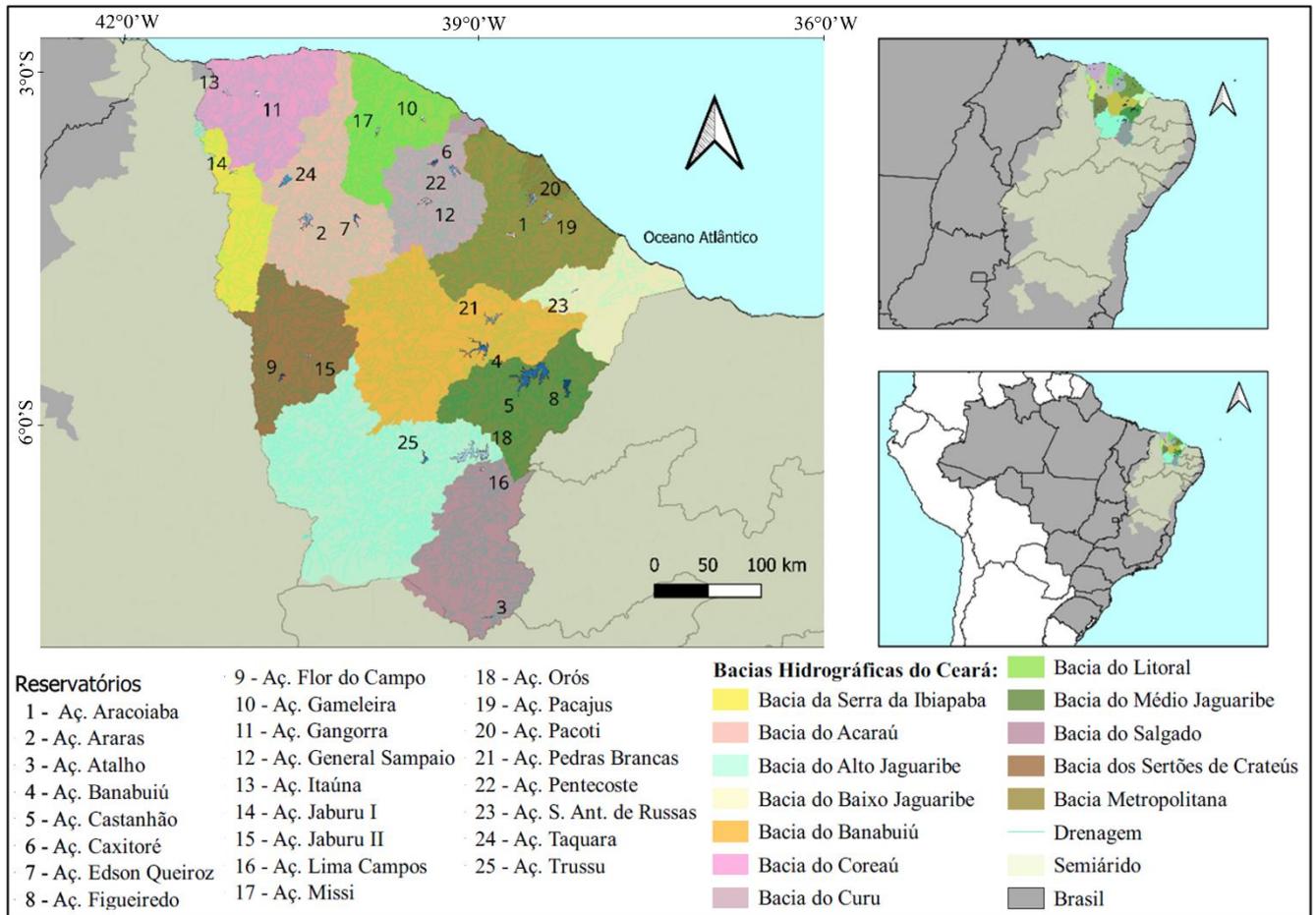
4 METODOLOGIA

4.1 Descrição da área de estudo

No aspecto hidrológico, o estado do Ceará é subdividido em 12 bacias hidrográficas, contemplando 157 reservatórios monitorados. Apresenta temperaturas anuais médias entre 27°C e 30°C e com período chuvoso entre os meses de janeiro e junho (1º semestre).

No estudo desse trabalho foram selecionados 25 reservatórios com maior capacidade hídrica, contemplando pelo menos um reservatório de cada bacia hidrográfica. Os corpos d'água em estudo possuem monitoramento trimestral na maioria dos reservatórios (alguns com monitoramento mensal). Informações sobre os reservatórios e a localização de cada um se encontra na Figura 4 e Tabela 2.

Figura 4 – Mapa do Estado do Ceará (com destaque para os reservatórios selecionados)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 2 – Informações dos reservatórios selecionados

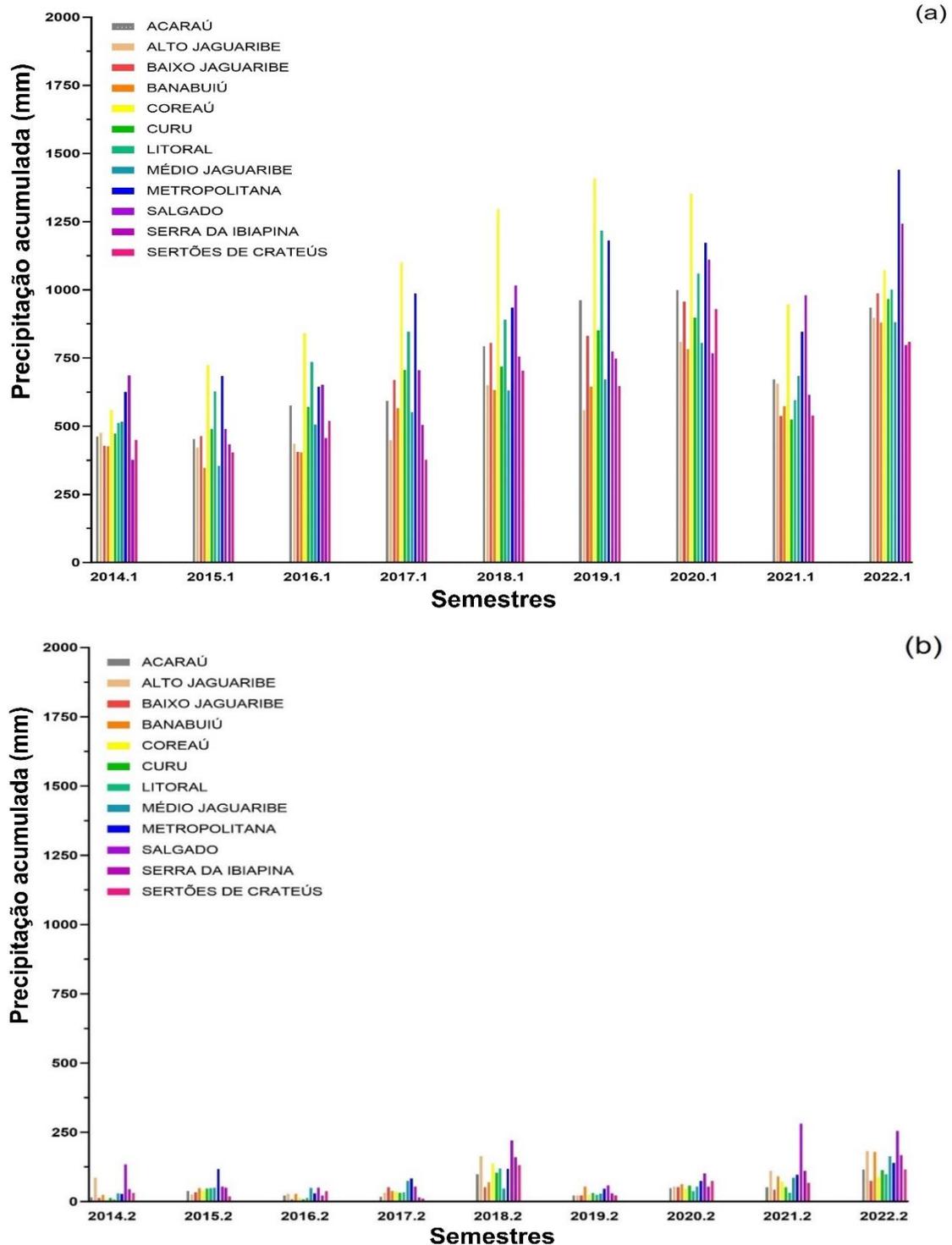
BACIA HIDROGRÁFICA	RESERVATÓRIO	MUNICÍPIO	ANO DE CONSTRUÇÃO	CAPACIDADE MÁXIMA (hm ³)	PROFUND. MÁXIMA (m)
ACARAÚ	ARARAS	VARJOTA	1958	891	38
	EDSON QUEIROZ	SANTA QUITÉRIA	1987	254	43
	TAQUARA	CARIRÉ	2012	274	31
ALTO JAGUARIBE	ORÓS	ORÓS	1961	1940	54
	TRUSSU	IGUATU	1996	301	36,3
BAIXO JAGUARIBE	SANTO ANTÔNIO DE RUSSAS	RUSSAS	1927	24	14
BANABUIÚ	BANABUIÚ	BANABUIÚ	1966	1601	57,7
	PEDRAS BRANCAS	QUIXADÁ	1978	434,05	33,6
COREAÚ	GANGORRA	GRANJA	1999	62,5	20,7
	ITAÚNA	GRANJA	2001	77,5	18
CURU	CAXITORÉ	UMIRIM	1962	202	41
	GENERAL SAMPAIO	GENERAL SAMPAIO	1935	322,2	37,6
	PENTECOSTE	PENTECOSTE	1957	395,63	29,4
LITORAL	GAMELEIRA	ITAPIPOCA	2012	52,64	19,5
	MISSI	MIRAÍMA	2011	65,30	17,3
MÉDIO JAGUARIBE	CASTANHÃO	ALTO SANTO	2003	6700	60
	FIGUEIREDO	ALTO SANTO	2013	519,6	33,5
METROPOLITANA	ARACOIABA	ARACOIABA	2002	170,7	35
	PACAJUS	CHOROZINHO	1993	240	-
	PACOTI	HORIZONTE	1981	380	27
SALGADO	ATALHO	BREJO SANTO	1991	108,25	42
	LIMA CAMPOS	ICÓ	1932	66,38	19
SERTÕES DE CRATEÚS	FLOR DO CAMPO	NOVO ORIENTE	1999	111,3	21,14
	JABURU II	INDEPENDÊNCIA	1984	116	16,2
SERRA DA IBIAPABA	JABURU I	UBAJARA	1983	138,13	46

Fonte: Ficha Técnica dos Açudes (COGERH, 2023).

(-) Dado indisponível

Os dados pluviométricos a seguir utilizados são referentes aos anos de 2014 – 2022, disponibilizados pelo site da COGERH e FUNCEME. A pluviosidade total nessas bacias hidrográficas é bastante variada entre si, mas todos apresentam perfil semelhante quanto a diferenciação nos dois semestres do ano, como indicado pela Figura 5.

Figura 5 – Precipitação total (em mm) das bacias hidrográficas cearenses: (a) no período chuvoso; (b) no período seco.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os reservatórios selecionados são utilizados para usos múltiplos, destacando-se a utilização para a dessedentação de animais, recreação de contato primário e secundário e pesca artesanal, sendo usos comuns a quase todos eles. Em decorrência destes e de outros usos, diversos impactos são ocasionados aos reservatórios, proveniente do despejo de esgoto doméstico, banhos, presença de animais soltos, entre outros (COGERH, 2021; Fonseca; Amaral; Navoni, 2024).

4.2 Coleta das amostras e análise dos parâmetros

As amostras foram coletadas em frascos plásticos escuros por técnicos treinados da COGERH, sendo identificadas e acondicionadas em ambiente refrigerado até os laboratórios de análise. Foram coletadas à profundidade de 0,3 metros, em torno de 50-60 metros de distância da margem. Para os 25 reservatórios selecionados, durante os 9 anos avaliados, foram coletados e analisados um total de 1058 amostras de água. Os parâmetros físico-químicos das amostras foram analisados pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece), enquanto o parâmetro biológico (contagem de cianobactérias) foi realizado pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) (de 2014 a 2019) e pela Conágua Ambiental (de 2020 a 2022), que prestam serviços à COGERH. Os métodos de análise de cada parâmetro estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros avaliados, com respectivas unidades e métodos de análise

PARÂMETRO	UNIDADE	LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO	MÉTODO DE ANÁLISE
Alcalinidade total	mg L ⁻¹	8,95 mg L ⁻¹	Titrimetria Ácido-Base (2320 B) ¹
Cálcio	mg L ⁻¹	0,4 mg L ⁻¹	Titrimetria com EDTA (3500-Ca B) ¹
Cloreto	mg L ⁻¹	7,35 mg L ⁻¹	Argentimétrico (4500-Cl B) ₁
Clorofila a	µg L ⁻¹	1,0 µg L ⁻¹	Espectrofotométrico (10200 H) ¹
Condutividade elétrica	µS/cm	2,0 µS/cm	Sonda multiparamétrica (in situ)
Contagem de cianobactérias	cél mL ⁻¹	-	Método de Utermöhl ²

Cor verdadeira	mg L ⁻¹	2,5 mg L ⁻¹	Método comparação visual (2120 B) ¹
Ferro	mg L ⁻¹	0,2 mg L ⁻¹	Fenantrolina (3500-Fe B) ¹
Fósforo total (P-total)	mg L ⁻¹	0,01 mg L ⁻¹	Método de persulfato para determinação simultânea (4500-P J) e Método de ácido ascórbico (4500-P E) ¹
Magnésio	mg L ⁻¹	0,24 mg L ⁻¹	Método do cálculo (3500-Mg B) ¹
Nitrogênio total (N-total)	mg L ⁻¹	0,025 mg L ⁻¹	Método de persulfato para determinação simultânea (4500-P J) e Método de Redução de Cádmio (4500-NO3- E) ¹
Oxigênio Dissolvido (OD)	mg L ⁻¹	-	Sonda multiparamétrica (in situ)
pH	-	-	Sonda multiparamétrica (in situ)
Sódio	mg L ⁻¹	2,0 mg L ⁻¹	Fotometria de Emissão de Chama (3500-Na B) ¹
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	mg L ⁻¹	2,0 mg L ⁻¹	Gravimetria (2540 D) e cálculo ¹
Temperatura da água	°C	-	Sonda multiparamétrica (in situ)
Transparência	m	-	Disco de Secchi (in situ)
Turbidez (TURB)	NTU	-	Nefelométrico (2130 B) ¹

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

¹ APHA (2017)

² Karlson *et al.* (2010)

(-) Dado indisponível

4.3 Ferramentas estatísticas e tratamento multivariado

Foram utilizados os *softwares* Excel e GraphPad Prism (10.1.1) na organização dos dados e nos procedimentos estatísticos deste estudo. Quanto a estatística descritiva, resultados de máximo, mínimo, média e coeficiente de variação (CV) foram obtidos. Gráficos do tipo violino (semelhantes a box-plot) foram elaborados para os dados de cada parâmetro, facilitando a observação da distribuição dos resultados e a presença de *outliers*, que foram removidos do conjunto de dados, pois estes poderiam gerar interpretações errôneas para os resultados gerais, sendo altamente influenciável em análises estatísticas multivariadas (Guedes *et al.*, 2012; Hongyu; Sandanielo; Oliveira Jr, 2016).

Para avaliar se o conjunto de dados seguem uma distribuição normal, foram realizados testes de normalidade com os valores para cada parâmetro estudado nesse trabalho. O software GraphPad Prism é capaz de realizar diferentes testes de normalidade, tendo sido aplicados os seguintes testes: Anderson-Darling, Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov.

Quanto a análise exploratória, utilizou-se a análise de componentes principais (PCA). Esse modelo estatístico de análises permite avaliar uma grande quantidade de dados, minimizando perdas de informação por meio de tratamento nos dados fornecidos (Marchetti *et al.*, 2015). Por meio da ferramenta estatística PCA, é possível interpretar os dados trabalhados, reduzir o número de parâmetros necessários a um grande conjunto de dados, observar correlações existentes e identificar a possível formação de grupos de amostras com semelhanças entre si, decorrente das variáveis trabalhadas (Worley; Halouska; Powers, 2013). Da forma que são calculados e distribuídos os dados, as amostras e parâmetros são apresentadas em “setores” do gráfico, separadas pelas linhas verticais (Componente Principal associado ao eixo X) e linhas horizontais (Componente Principal associado ao eixo Y).

Neste trabalho, foi aplicado o pré-processamento nos dados do tipo autoescalamento, que considera todos os parâmetros como importante na análise inicial, independente da unidade de medida e da amplitude dos dados (Correia; Ferreira, 2007). Este tipo de pré-processamento realiza mudanças numéricas nos dados, centrando-os na média, equilibrando os “pesos” que cada variável poderia desempenhar (Folli *et al.*, 2023). Para isso, utiliza-se a equação (1):

$$x_{ij}(\text{auto}) = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (1)$$

Sendo: $x_{ij}(\text{auto})$ = medida autoescalada do parâmetro; x_{ij} = medida do parâmetro; \bar{x}_j = média do parâmetro; S_j = desvio-padrão do parâmetro.

Nos estudos de correlação, foram avaliadas as correlações de parâmetro x parâmetro, sendo obtida uma matriz de resultados com os coeficientes de correlação. Só foram utilizados dados que houvessem o par de resultados a ser comparado num mesmo período de análise.

O valor do coeficiente de correlação para o conjunto de dados foi utilizado na avaliação das correlações obtidas neste estudo. Valores próximo de 1,0 indicam correlação direta entre os parâmetros, enquanto valores próximos de -1,0 indicam correlação inversa entre eles. A “força” dessas associações entre os parâmetros foi definida pelas faixas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação da “força” de correlação dos parâmetros

Faixa de r (em módulo)	Classificação
$0,0 \leq r \leq 0,1$	Não-correlacionado
$0,1 < r \leq 0,3$	Correlação fraca
$0,3 < r \leq 0,5$	Correlação moderada
$0,5 < r \leq 1,0$	Correlação forte

Fonte: Adaptado de Xiao *et al.*, (2016).

4.4 Construção do Índice de Estado Trófico

A elaboração das expressões que compõem o IET neste trabalho tem como base o estudo de Carlson (1977). Em seu estudo, a expressão inicial para determinação do estado trófico é apresentada na equação (2).

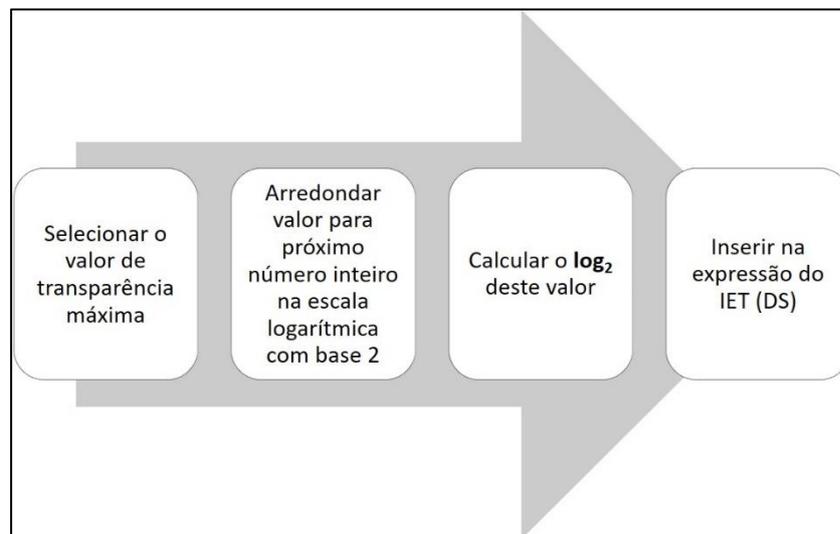
$$\text{IET (DS)} = 10.(6 - \log_2 \text{DS}) \quad (2)$$

Sendo: IET (DS) = Índice de Estado Trófico em função da transparência; DS = transparência (m);

Nesta equação, o valor 10 (dez) é um termo multiplicativo para tornar os valores numa faixa de 0-100. O valor 6 (seis) está associado com a medida máxima de transparência registrada. As outras expressões de IET em função de fósforo total e de clorofila *a* são oriundas das correlações destes parâmetros com a transparência.

Para construção do IET baseado em resultados do semiárido, foi utilizada a medida máxima de transparência, em substituição ao valor 6 (seis), seguindo as ações indicadas pela Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma de etapas para expressão-base do IET(DS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As demais expressões foram elaboradas por estudo de correlações do tipo parâmetro x transparência e substituídas na equação gerada a partir das etapas anteriores (Figura 6), segundo a eficiência das correlações obtidas. As faixas dos valores de cada parâmetro foram definidas pela análise de percentil no conjunto de dados, como citado no tópico 3.3 (Eutrofização e índice de estado trófico).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos

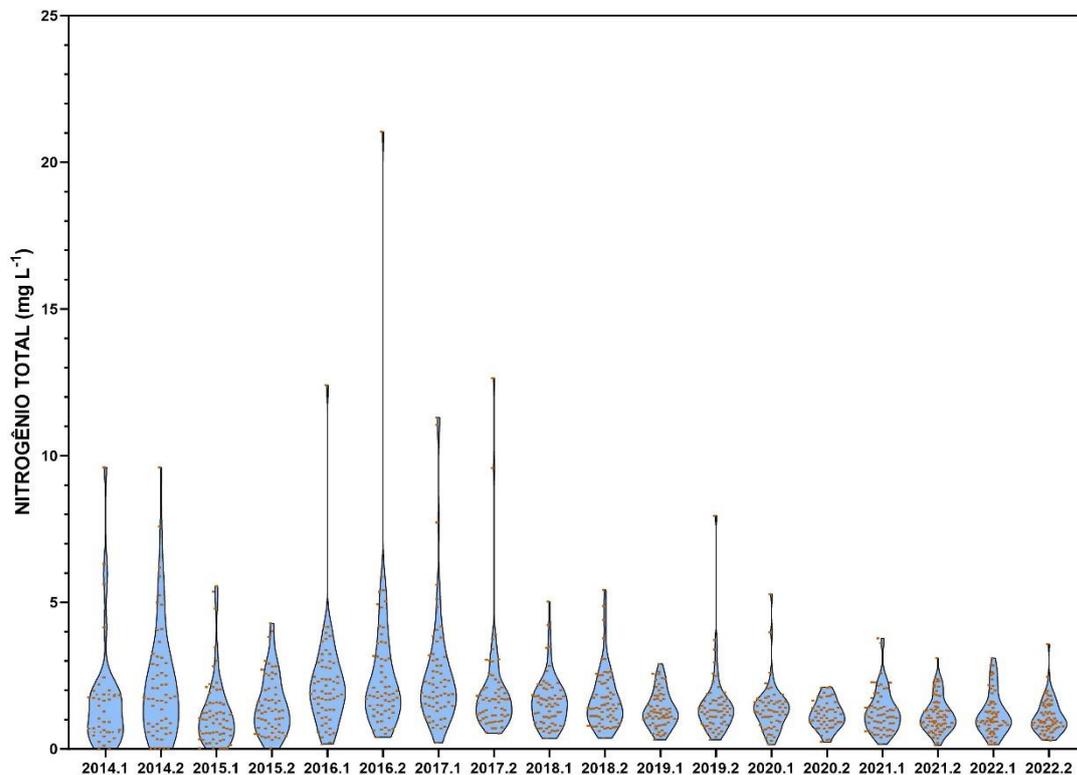
A avaliação apresentada aqui busca compreender as variações desses parâmetros nos reservatórios estudados, observando a ocorrência de padrões ou tendências de comportamento dessas espécies nos corpos hídricos.

Para os reservatórios estudados nesse trabalho, não há até o momento o enquadramento oficial na categoria de águas doces. Diante disso, quando necessária avaliação/comparação com dados padrões de qualidade, considera-se o exposto no Art. 42 da Resolução CONAMA N° 357/2005, tratando esses corpos hídricos como águas de Classe 2 (BRASIL, 2005).

5.1.1 Nitrogênio total e fósforo total

A Figura 7 apresenta os dados para o nitrogênio total.

Figura 7 – Variação de nitrogênio total (NT) nos reservatórios estudados



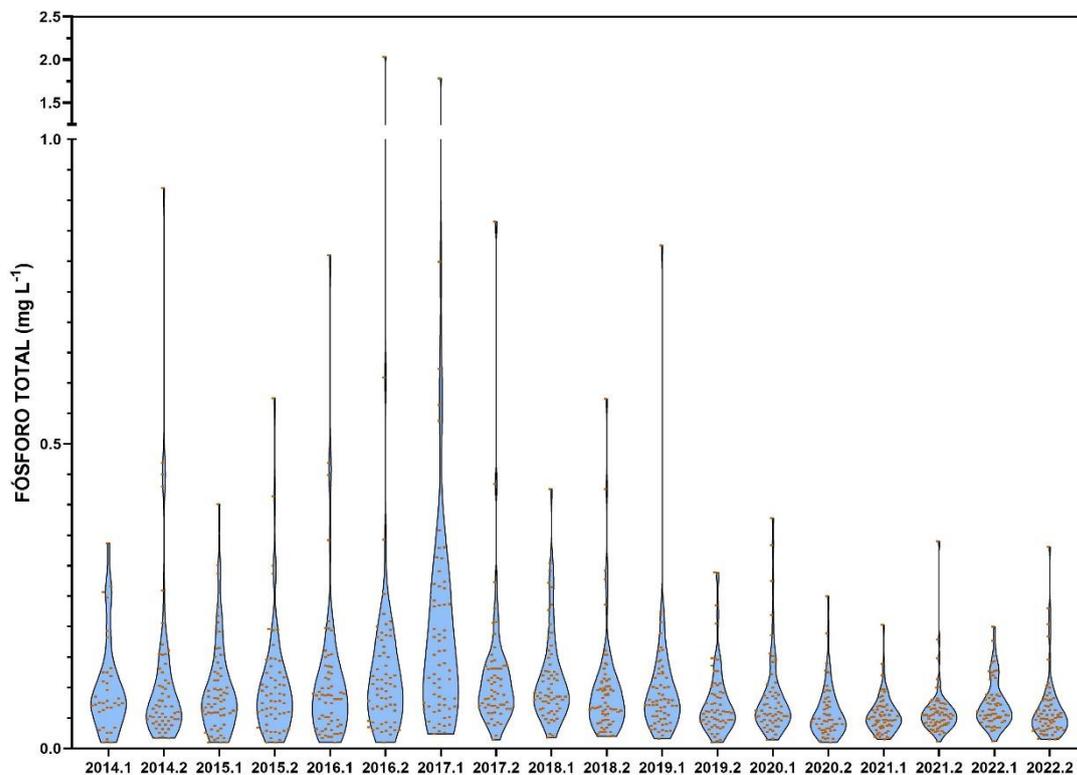
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A concentração de N-Total apresentou valor máximo em 2016.2, no reservatório Jaburu II (21,04 mg L⁻¹) e mínimo em 2015.1 em Pacoti, Pedras Brancas e Taquara (0,025 mg L⁻¹). Pelo gráfico se observa que as medidas desse parâmetro se concentram em torno de 2 mg L⁻¹, apresentando um coeficiente de variação (CV) máximo de 108% nos dados.

Pelos dados da análise descritiva, foi observado que as concentrações médias de nitrogênio foram maiores no período seco que no período chuvoso (em torno de 10 – 20%).

Quanto a distribuição do fósforo com tempo (Figura 8), a variação média das concentrações é pouco acentuada.

Figura 8 – Variação de fósforo total (PT) nos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Novamente, o reservatório Jaburu II, 2016.2, registrou a maior concentração de fósforo total no período estudado (2,033 mg L⁻¹). Enquanto o valor mínimo registrado foi em Aracoiaba, cuja concentração foi de 0,01 mg L⁻¹, valor este semelhante ao registrado nos estudos de Rolim *et al.* (2019).

Pela análise descritiva, notou-se que os coeficientes de variação mais elevados foram registrados, majoritariamente, nos períodos de seca, atingindo uma variação máxima de 178,7% em 2016.2. Nos 3 primeiros anos desse estudo (2014, 2015 e 2016) a concentração

média de fósforo no período de seca foi maior que no período chuvoso, havendo uma inversão desse comportamento nos anos posteriores.

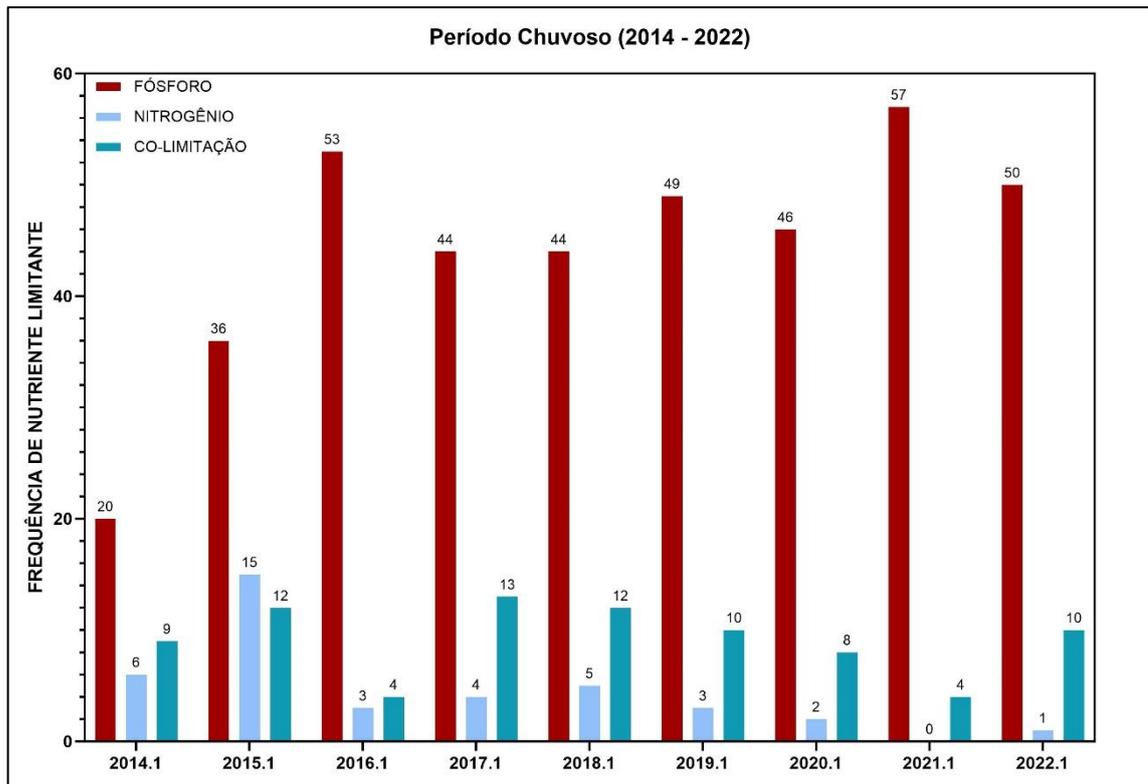
Os anos de 2014 e 2015 estavam inseridos num período de grande estiagem no estado do Ceará, caracterizado por altas temperaturas e taxa de evaporação nos corpos hídricos (Marengo *et al.*, 2018). O ano de 2016 foi como uma transição do fim do período de estiagem, sendo ano de 2017 e os subsequentes períodos com pluviosidade mais abundante, principalmente no 1º semestre de cada ano, gerando um revolvimento de materiais depositados nas bordas e fundo dos reservatórios, acarretando uma disponibilidade maior de fósforo no meio.

O valor máximo permitido (VMP) de fósforo total é de $0,03 \text{ mg L}^{-1}$ (para águas de classe 2 e ambientes lênticos), segundo CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005). Diante dessa informação, 87% dos resultados estudados apresentaram valores superiores à $0,03 \text{ mg L}^{-1}$, tanto nos períodos chuvosos quanto de estiagem. Apesar disto, não há uma associação direta quanto ao grau de eutrofização dos reservatórios e a ocorrência de valores superiores ao VMP, segundo a Resolução do CONAMA.

Os elevados teores de fósforo podem ser decorrentes de diferentes impactos sofridos por esses reservatórios, como práticas de piscicultura, agricultura, pecuária, despejo de esgotos não-tratados, entre outras fontes (COGERH, 2021).

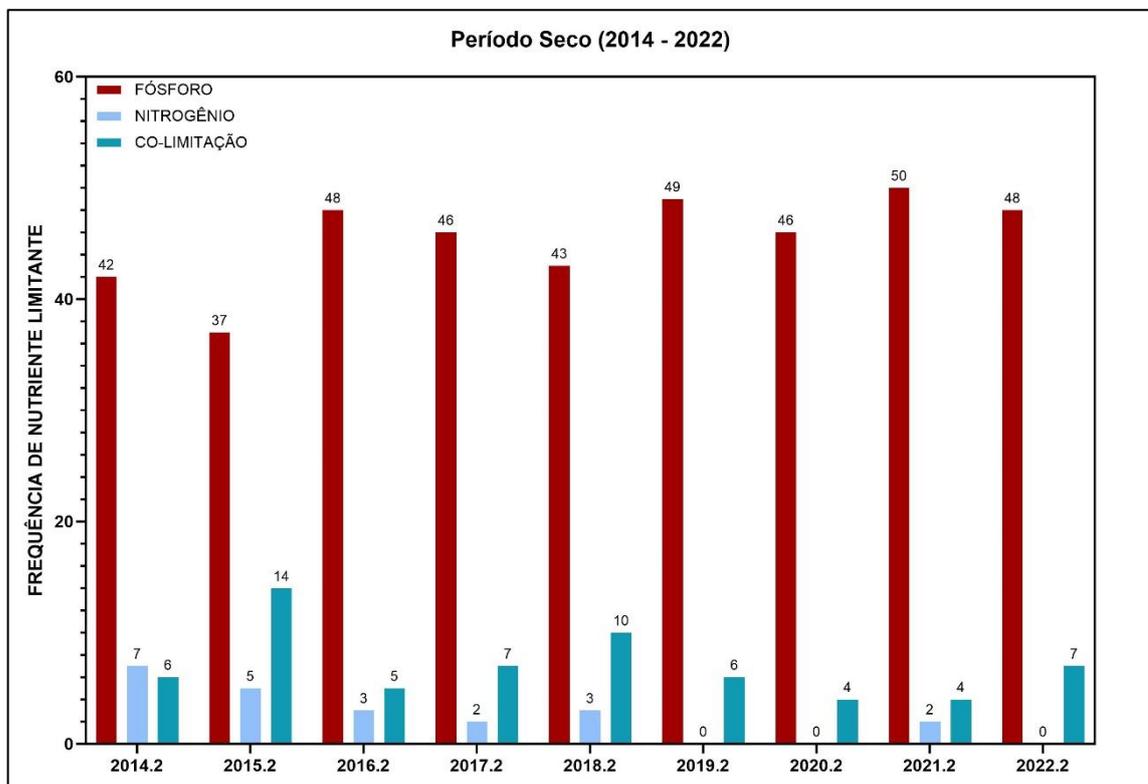
Levando em consideração a relação dos nutrientes (nitrogênio e fósforo), também foi avaliada a proporção destes com passar do tempo, apresentados nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Variação da relação entre nitrogênio e fósforo (N:P) durante período chuvoso



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 10 – Variação da relação entre nitrogênio e fósforo (N:P) durante período seco



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A avaliação do nutriente limitante nesse estudo levou em consideração a razão N:P abordada por Paulino e colaboradores (2013), onde se identifica a limitação por fósforo em valores superiores a 22 e valores inferiores a 10, limitação por nitrogênio. A ocorrência de valores intermediários seria compreendida como uma participação conjunta dos dois nutrientes no processo de limitação do desenvolvimento das espécies aquáticas.

A limitação por fósforo é predominante em praticamente todas as bacias no período estudado. Também é observado uma frequência maior de colimitação dos nutrientes do que exclusivamente a limitação por nitrogênio.

Quanto ao nitrogênio, apenas na bacia Sertões de Crateús, no ano de 2018, houve predominância desse nutriente como limitante. Em 2019 e 2020, houve predominância de colimitação dos nutrientes, enquanto para os outros anos do estudo, houve a limitação por fósforo, majoritariamente.

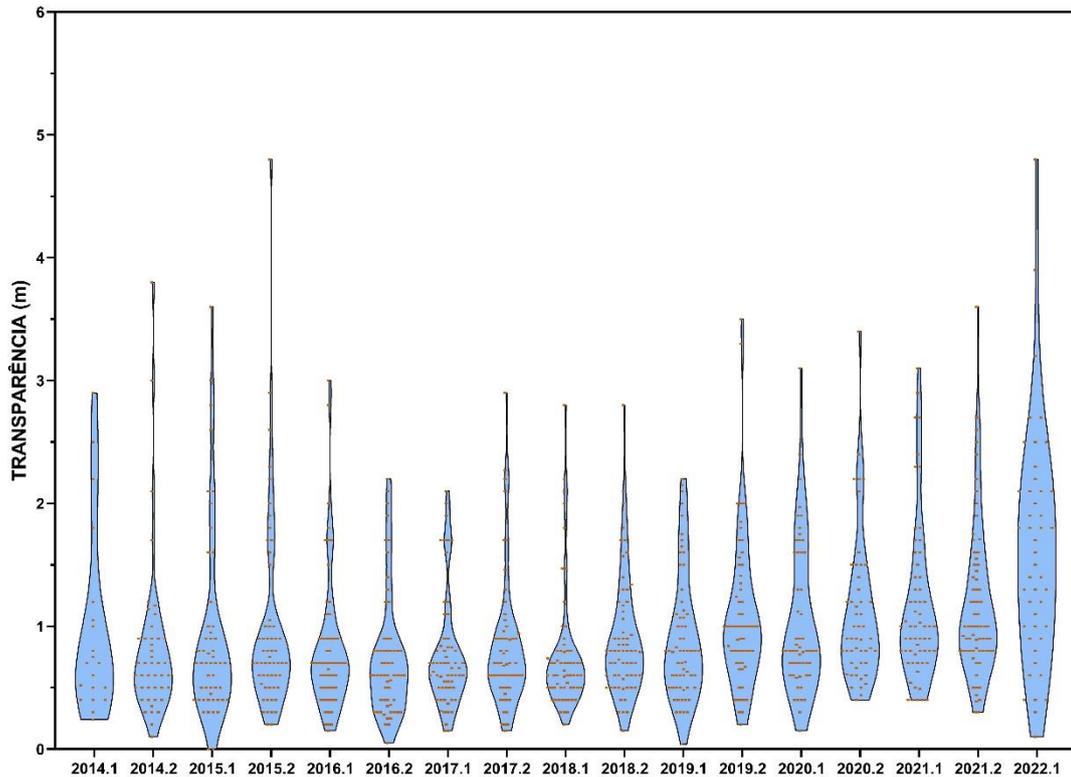
Estudo apresentado por Paulino (2013), indicou como predominante a limitação por fósforo nos reservatórios (aprox. 85%), indicando concordância no comportamento dos reservatórios estudados neste trabalho.

Dispondo desta informação quanto ao nutriente limitante (fósforo), a utilização deste parâmetro se torna mais importante no estudo da proposição de novo IET, apresentado nos tópicos posteriores.

5.1.2 Transparência, turbidez e cor

A Figura 11 contém os valores de transparência no período estudado.

Figura 11 – Variação da transparência da água (DS) nos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Pelo gráfico, destaca-se o valor registrado de 4,8 metros, ocorrido no reservatório Pentecoste (2015.2). Alguns outros reservatórios nesse estudo atingiram uma faixa de valores elevada (superior a 3,0 metros de profundidade). Alguns outros resultados elevados de transparência são (em ordem decrescente): 3,8 m (Castanhão/2014.2); 3,6 m (Itaúna/2021.2); 3,4 m (Jaburu I/ 2020.2); 3,1 m (Araras/2021.1). No reservatório Castanhão, foi registrada transparência máxima de 4,0 metros em 2011, frente a valores médios apresentados que variavam de 2,3 m à 3,4 m de transparência nos anos de 2011 a 2014 (Santos *et al.*, 2017).

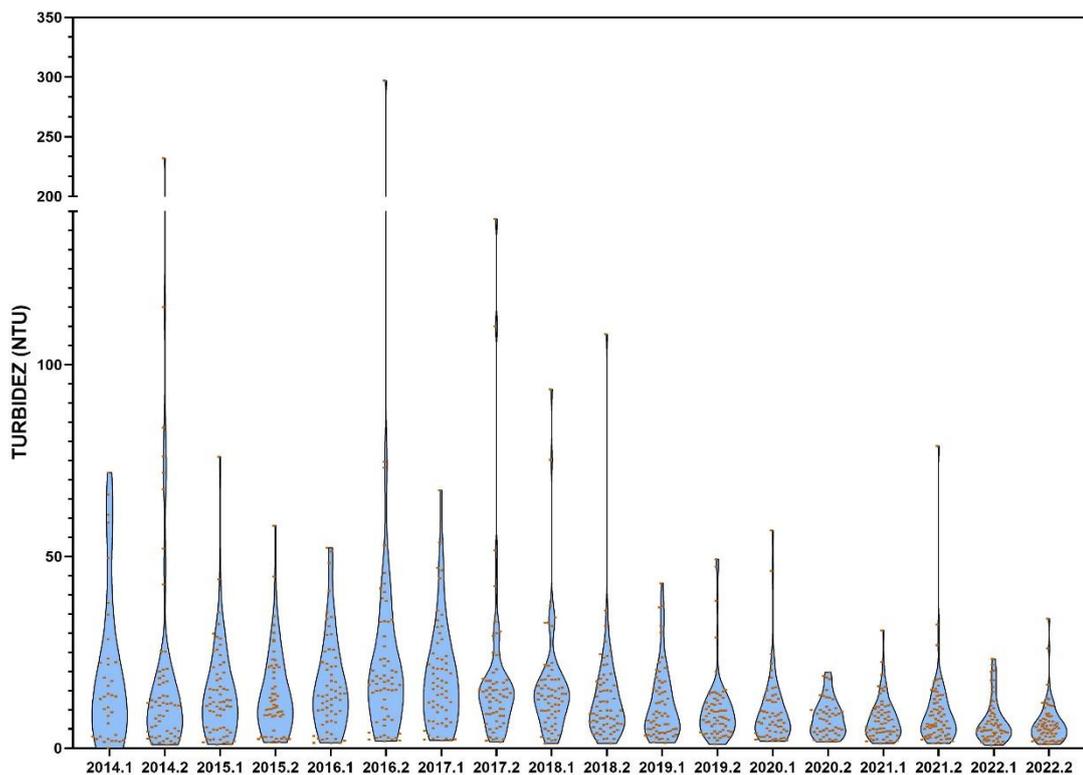
Os valores médios da profundidade observável nos reservatórios sofrem pouca diferenciação entre os períodos (0,85 m à 1,0 m). Apesar do valor máximo de transparência registrado em 2015.2, o maior coeficiente de variação obtido foi no período de 2015.1 (CV = 82,9%).

Essa variação nas medidas de transparência nestes reservatórios citados e os deste estudo, apesar de pertencerem a região de clima semiárido, são pertencentes a diferentes bacias hidrográficas do estado, onde os efeitos característicos do semiárido (elevada evaporação e baixa pluviosidade) podem ser mais acentuados ou atenuados nestas diferentes bacias, ocasionando uma dinâmica hídrica distinta, tanto nos aspectos físicos e químicos quanto nos biológicos.

Este valor máximo registrado de transparência no reservatório Pentecoste foi selecionado como valor base para elaboração das relações matemáticas entre os parâmetros estudados e o IET para os reservatórios do semiárido.

A Figura 12 representa os valores de turbidez ao longo de 9 anos.

Figura 12 – Variação de turbidez nos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

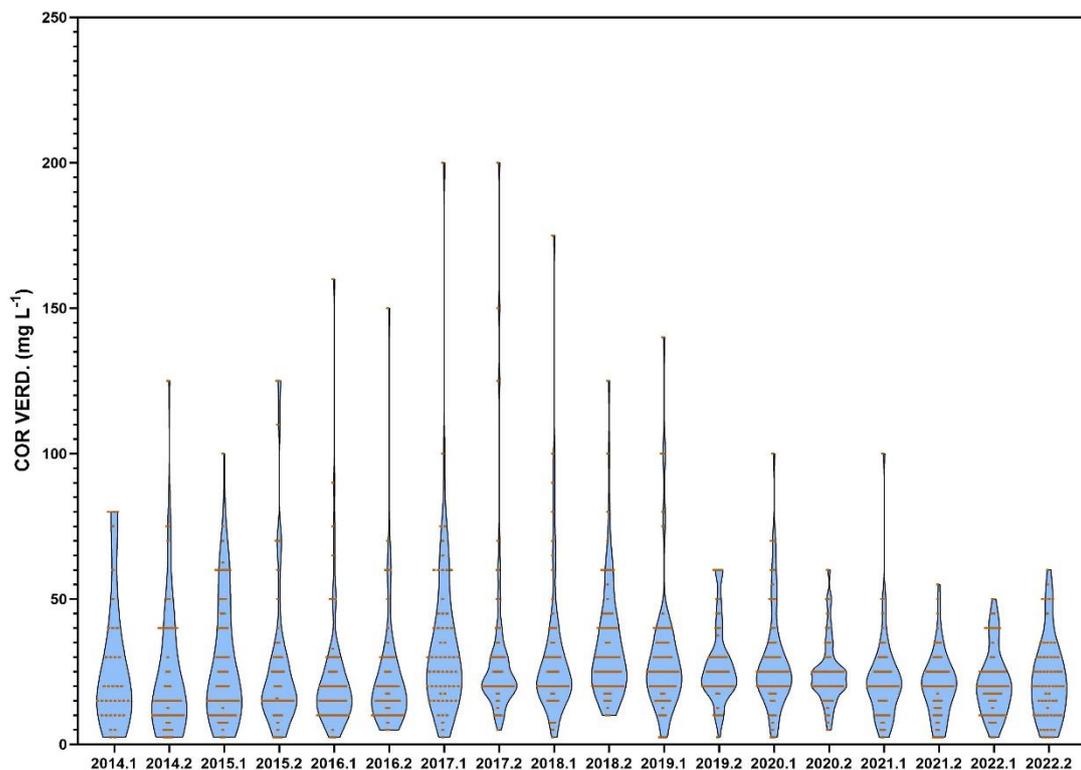
Em 2016.2, houve a maior medição de turbidez: 297 NTU, ocorrido no reservatório Jaburu II (Bacia Sertões de Crateús), valor esse muito além do resultado médio para esse parâmetro (13,58 NTU), sendo superior em mais de 20 vezes. Para esse mesmo período houve uma elevada amplitude nos dados, refletindo no coeficiente de variação ($CV = 158,2\%$).

Nos últimos 3 anos de estudo, é possível observar uma menor variabilidade nos resultados, visualmente percebido pelo “achatamento” dos gráficos correspondentes aos anos 2020, 2021 e 2022 e por apresentar CV menores (61,71%; 73,47%; 80,13%, respectivamente).

Pela Resolução CONAMA 357/2005, o VMP é de 100 NTU para águas doces de classe 2 (BRASIL, 2005). A grande maioria dos resultados estão dentro do limite apresentado na Resolução (99,43% das medidas estão de acordo com a legislação). Esses poucos casos com elevado valor de turbidez devem ter ocorrido de forma pontual, não sendo resultados reproduzidos várias vezes em seguida.

Os dados sobre o parâmetro cor verdadeira são apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Variação da cor verdadeira nos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A medida máxima desse parâmetro foi de 200 mg L⁻¹, sendo registrado em dois momentos: em 2017.1 e 2017.2, ambos no reservatório Santo Antônio de Russas (Bacia Baixo Jaguaribe).

Comparando com os outros parâmetros medidos em água, a cor verdadeira obteve valores de CV mais baixos, como os registrados em 2019.2 e 2020.2 (CV = 49,27% e 44,43%, respectivamente).

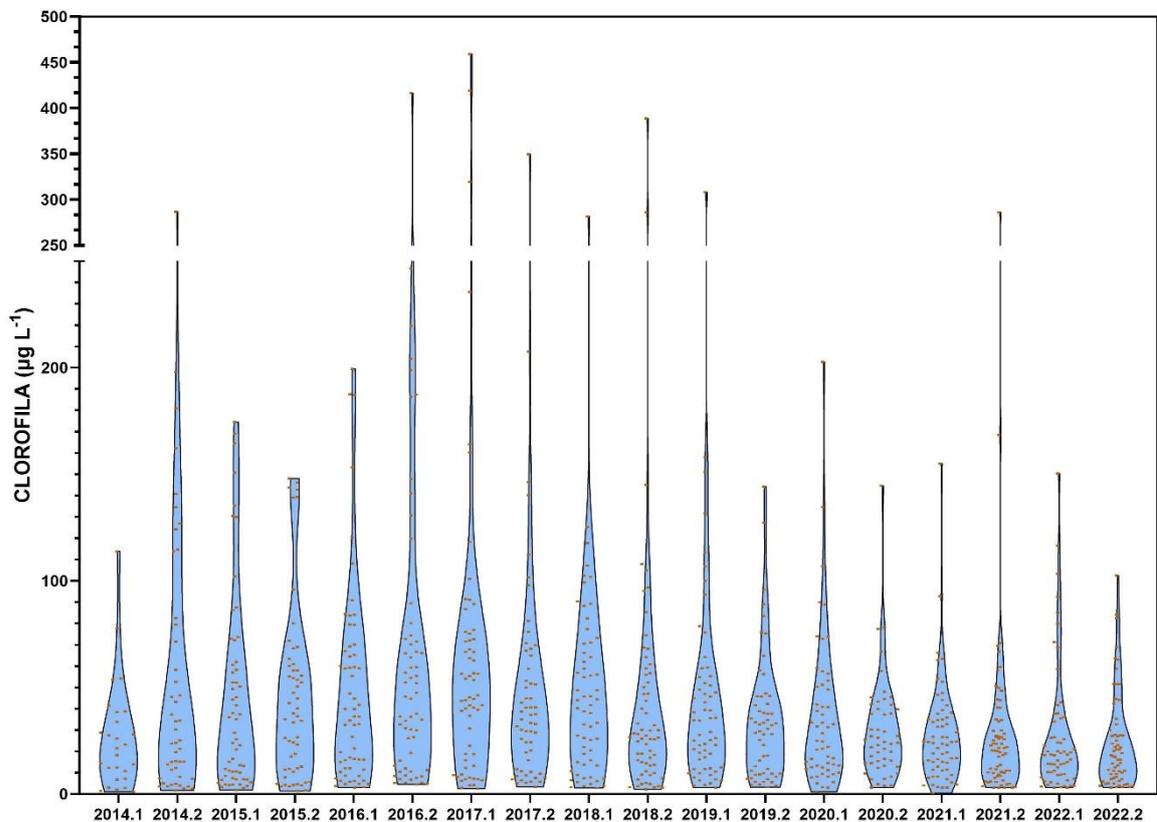
Analisando os anos que integram o período de seca no Ceará (2014 e 2015), percebe-se que o valor médio desse parâmetro foi de 26,08 mg L⁻¹. Comparando com os anos posteriores pós-seca (2016, 2017 e 2018), o valor médio foi de 30,1 mg L⁻¹. Segundo Freire (2020), é esperado a ocorrência do aumento da cor do corpo hídrico, devido ao transporte de sedimentos acumulados (orgânicos e inorgânicos) que podem ter sido remobilizados com o aporte das novas águas.

De acordo com a Resolução 357/2005, o limite para o parâmetro cor verdadeira é de até 75 mg L⁻¹. Pelo conjunto dos dados dessa variável, apenas 2,73% dos resultados estão acima do indicado pela Resolução.

5.1.3 Clorofila *a*, contagem de cianobactérias e oxigênio dissolvido

Os dados para os valores de clorofila *a* são apresentados pela Figura 14.

Figura 14 – Variação de clorofila *a* nos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

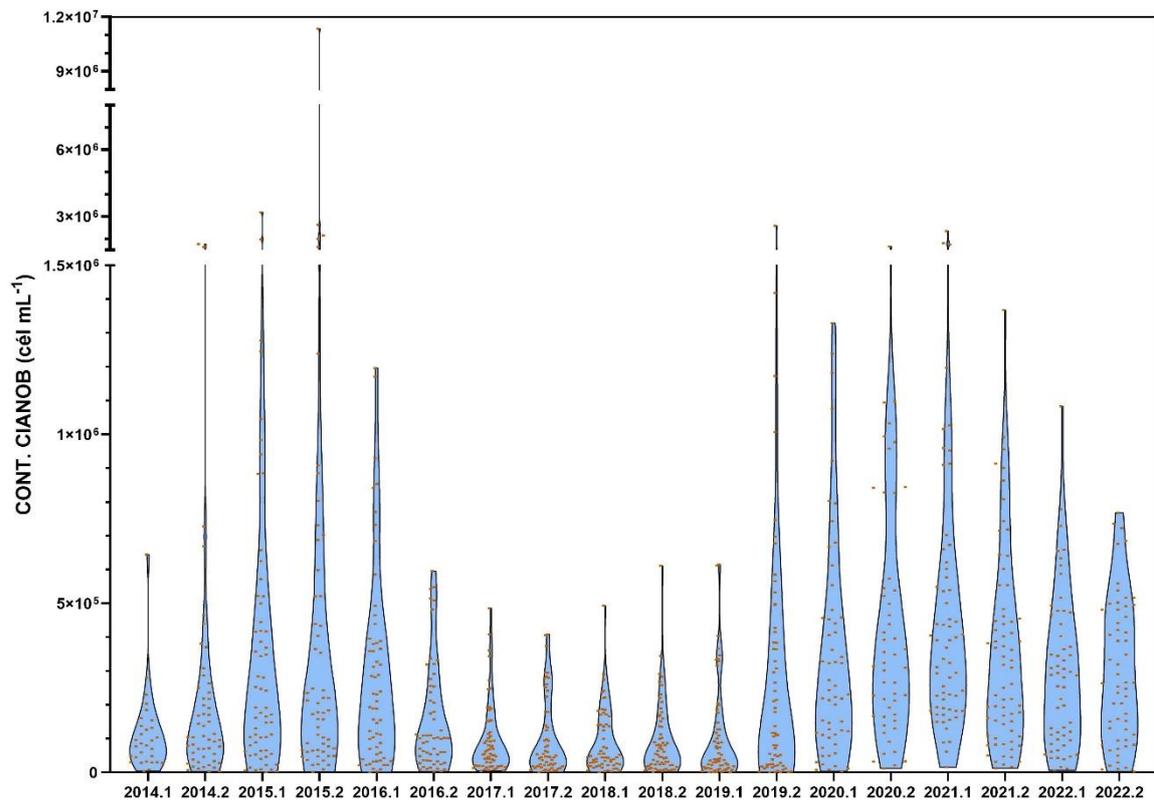
A concentração máxima registrada foi de 459,2 $\mu\text{g L}^{-1}$ no reservatório Jaburu II (Bacia Sertões de Crateús), em 2017.1, já a medida mínima registrada foi 1,45 $\mu\text{g L}^{-1}$ no reservatório Jaburu I (Bacia Serra da Ibiapaba), em 2015.2. Apesar o valor elevado em 2017.1, o coeficiente de variação máximo calculado foi registrado em 2018.2 (CV = 139,5%).

Quanto ao comparativo com a Resolução CONAMA (VMP = 30 $\mu\text{g L}^{-1}$ de clorofila *a*), aproximadamente 44,4% dos resultados de clorofila foram superiores ao VMP (BRASIL, 2005). Destaca-se ainda a amplitude de alguns resultados, como a concentração de 416,52 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Jaburu II/2016.2); 388,8 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Pedras Brancas/2018.2); 349,53 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Santo Antônio de Russas/2017.2). Essas concentrações são aproximadamente de 11(onze) a 14 (catorze) vezes superior ao que é permitido pelo CONAMA.

Apesar dos valores apresentados na Resolução CONAMA não indicarem faixas de qualidade associado à eutrofização dos corpos hídricos, utiliza-se no momento como valor base a fim de comparação. Considerando que o parâmetro clorofila *a* é comumente associado com biomassa algal (produtividade na água) e está frequentemente associado também com a avaliação da eutrofização, por meio do IET, estima-se que os reservatórios estudados apresentem classificação trófica de eutrófico ou superior, referente a elevada quantidade de valores superiores ao VMP da resolução citada.

A Figura 15 contém os dados de cianobactérias no período estudado.

Figura 15 – Variação da contagem de cianobactérias nos reservatórios estudados



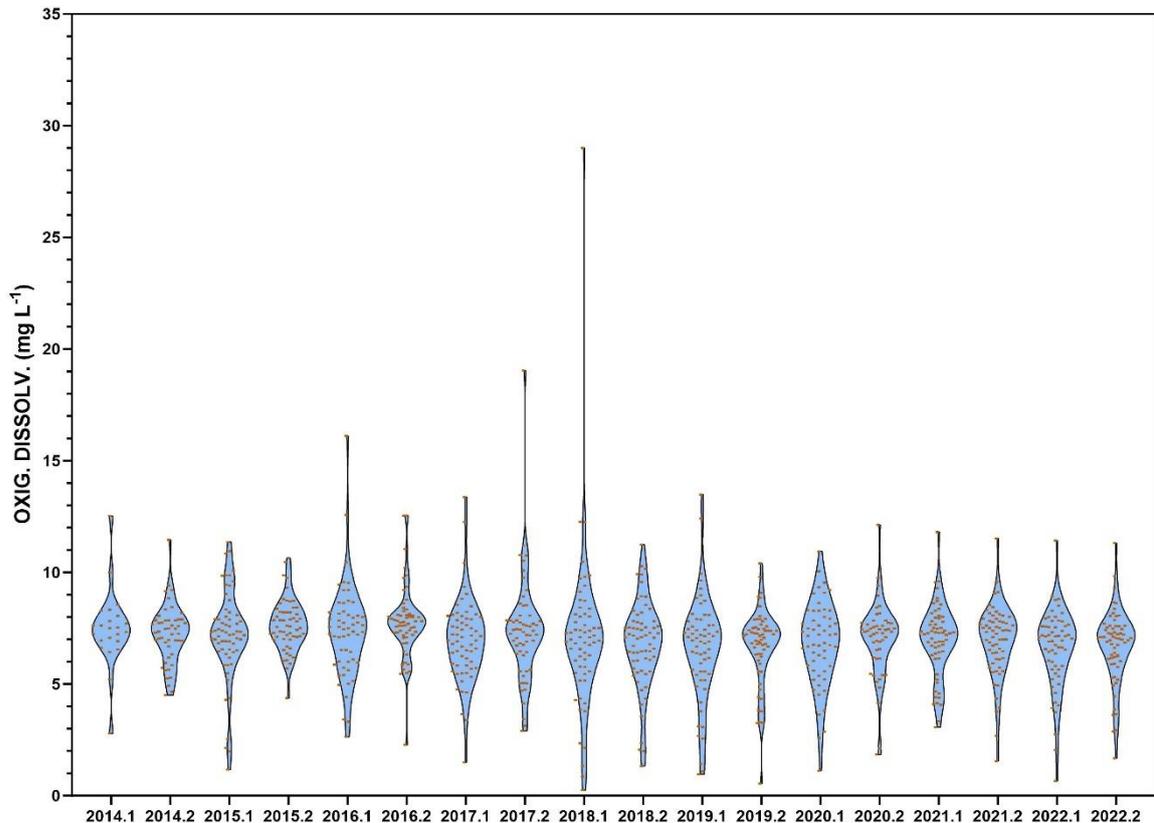
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O valor máximo registrado foi de 11.350.134 cél mL⁻¹, ocorrido em 2015.2, no reservatório Atalho (Bacia do Salgado), enquanto 518 cél mL⁻¹ foi o valor mínimo registrado em 2019.1, no reservatório Itaúna (Bacia do Coreaú). A amplitude entre esses valores é imensa, correspondendo a uma diferença de mais de 20.000 vezes entre esses valores de máximo e mínimo. O CV máximo calculado foi de 265,2%, para o período 2015.2.

Comparando com o VMP para cianobactérias (50.000 cél mL⁻¹), todos os valores médios para cada período apresentado (tanto chuvoso quanto seco) foram acima do permitido (menor concentração média = 408.848 cél mL⁻¹). Em alguns períodos, houveram resultados que atingiram valores bem elevados, como nos reservatórios Missi (2.625.883 cél mL⁻¹ /2015.2) e Edson Queiroz (3.182.890 cél mL⁻¹ /2015.1). E, em destaque no gráfico, máximo de 11.3 milhões (aprox.), sendo 227 vezes superior ao VMP, ocasionando possível liberação de muito mais toxinas e comprometendo o uso destas águas para dessedentação de seres humanos e animais, além de demais usos previstos para águas de classe 2

A Figura 16 contém os valores de oxigênio dissolvido no período estudado.

Figura 16 – Variação de oxigênio dissolvido (OD) nos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para o oxigênio dissolvido (OD), a concentração máxima foi 29 mg L⁻¹, medida no reservatório Edson Queiroz (2018.1). O valor mínimo foi de 0,55 mg L⁻¹, no reservatório Araras (2019.2). Para o mesmo período registrado a medida máxima, houve o coeficiente de variação mais elevado para esses períodos (CV = 53,32%).

Alguns resultados elevados de OD ocorreram em reservatórios que apresentaram elevados valores de cianobactérias, num mesmo período de análise, como o reservatório Araras (OD = 16,11 mg L⁻¹ / CIANO = 359.091 cél mL⁻¹) no período 2016.1 e o reservatório Lima Campos (OD = 13,48 mg L⁻¹ / CIANO = 346.645 cel mL⁻¹) no período 2019.1.

A grande presença de organismos fitoplanctônicos (como cianobactérias), podem elevar as quantidades de oxigênio no meio, pela elevada atividade fotossintética realizadas por elas, podendo ocorrer supersaturação no corpo hídrico (LIMA, 2019; ROLIM, 2016).

No reservatório Orós (período de 2008-2010) o oxigênio dissolvido apresentou valores de máximo e mínimo de formas distintas ao deste trabalho (FERREIRA *et al.*, 2015). As concentrações máximas foram de 9,53 mg L⁻¹, sendo o valor de Orós em torno de 67%

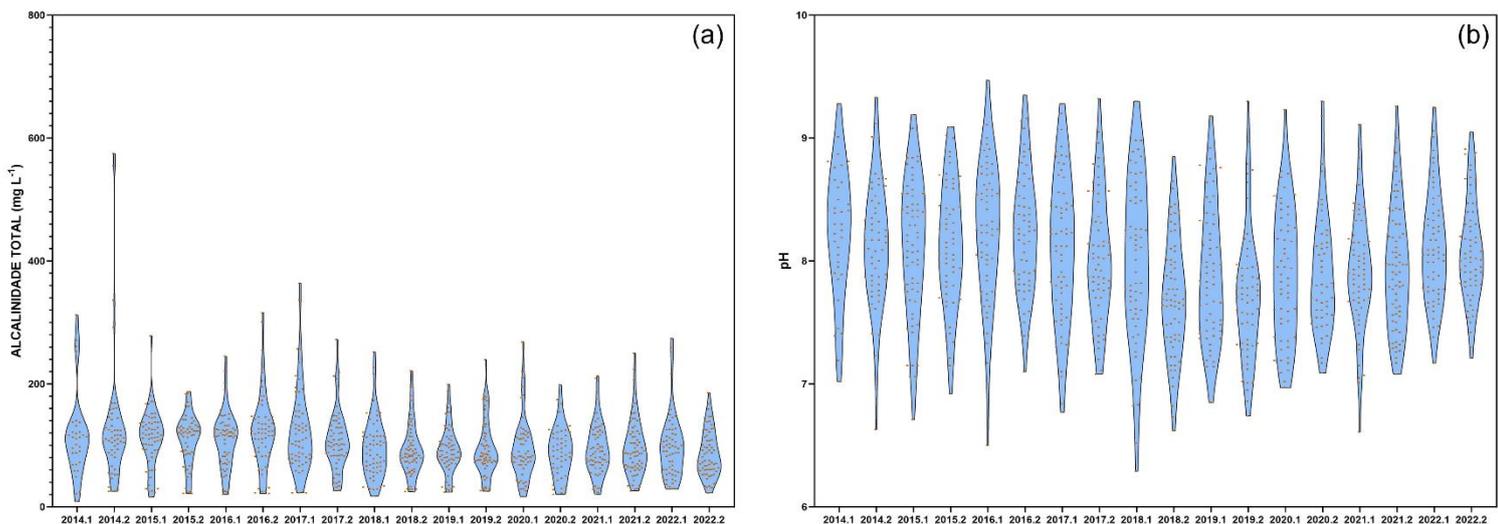
menor que o máximo registrado nesse trabalho. A concentração mínima foi de $2,05 \text{ mg L}^{-1}$, sendo o resultado de Araras (2019.2) inferior ao obtido por Ferreira *et al.* (2015).

Pela observação gráfica dos resultados, percebe-se que grande parte dos valores estão compreendidos entre as concentrações de $5 - 10 \text{ mg L}^{-1}$. A Resolução CONAMA 357/2005 informa que a concentração mínima para estes corpos hídricos é de 5 mg L^{-1} (BRASIL, 2005).

5.1.4 Alcalinidade, pH e temperatura

A Figura 17 contém os gráficos de alcalinidade total (a) e pH (b) no período estudado.

Figura 17 – Variação dos parâmetros: (a) alcalinidade total; (b) pH



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

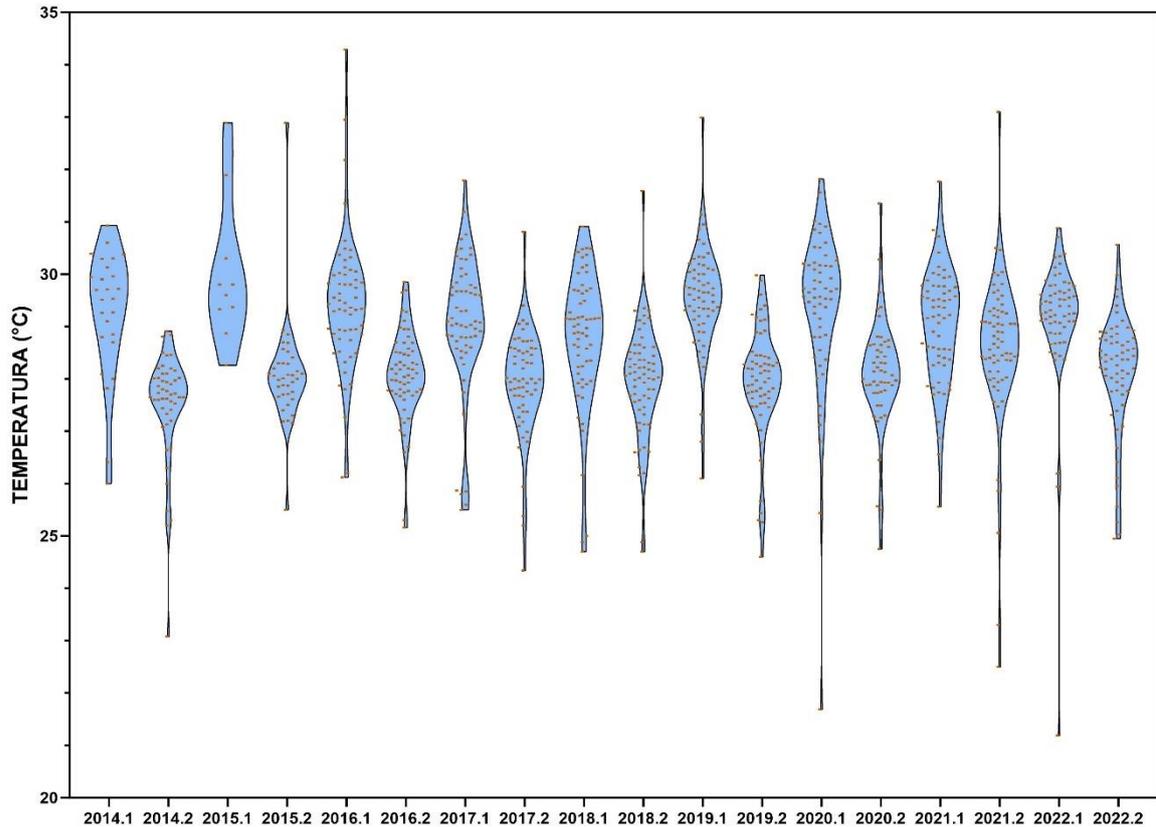
Nas medidas de alcalinidade total, o reservatório Jaburu II apresentou a maior concentração desse parâmetro – $574,8 \text{ mg L}^{-1}$, em 2014.2, enquanto o menor valor registrado foi de $15,97 \text{ mg L}^{-1}$, no reservatório Gangorra, em 2015.1. O CV máximo também ocorreu no mesmo período da medida máxima, em torno de 80,80%. A partir do conjunto de dados e do aspecto representativo do gráfico, percebe-se que os valores se concentram na faixa que varia de $20 - 180 \text{ mg L}^{-1}$.

O parâmetro pH teve baixos valores de coeficiente de variação ($\text{CV}_{\text{máx}} = 7,27\%$) devido a faixa de medida se apresentar em valores muito próximos frequentemente. O valor máximo e mínimo foram, respectivamente: 9,47 (Lima Campos/2016.1) e 6,29 (Santo Antônio

de Russas/2018.1). Segundo CONAMA 357/2005, há uma faixa ideal para os valores de pH (entre 6 – 9) (BRASIL, 2005). Praticamente todos os resultados estão inseridos nessa faixa apresentada, tendo apenas 3,1% dos dados fora do limite superior exigido.

A Figura 18 contém as medidas de temperatura no período estudado.

Figura 18 – Variação da temperatura nos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

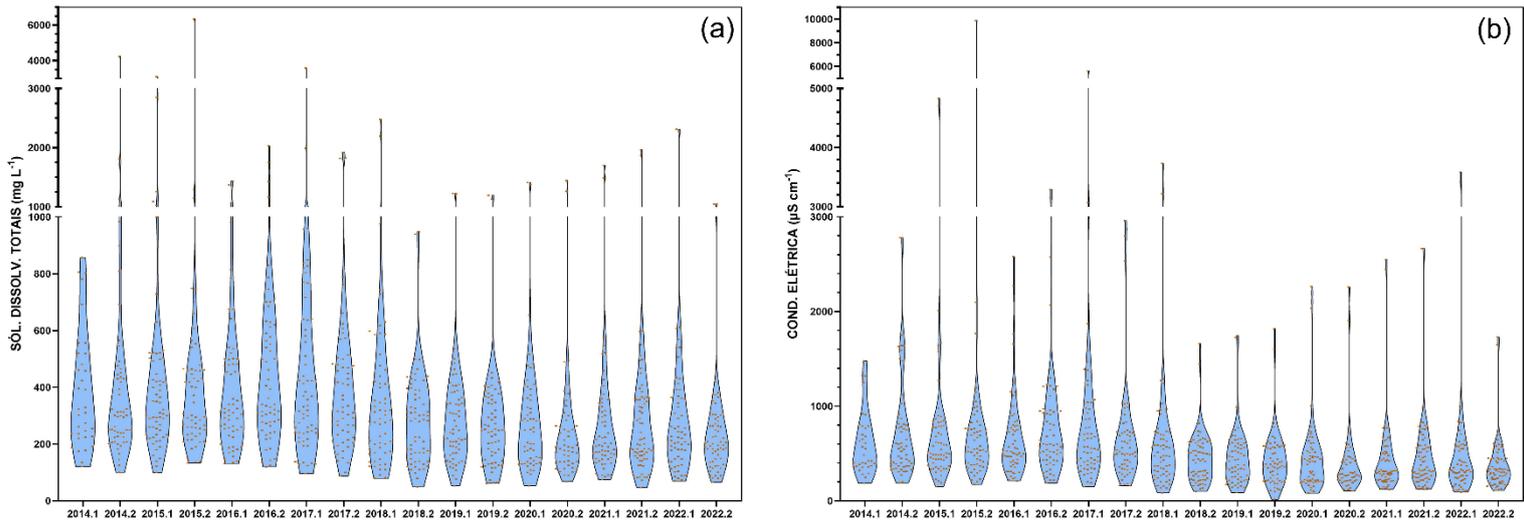
A medida máxima de temperatura foi 34,29 °C (2016.1), no reservatório Lima Campos. A medida mínima ocorreu em 2020.1, no reservatório Missi, com valor de 21,69 °C. Entre todos os parâmetros estudados nessa pesquisa, a temperatura obteve os menores valores de coeficiente de variação, atingindo o valor máximo de 5,38%, no semestre 2020.1.

Pelo conjunto de dados e a representação gráfica, percebe-se que os valores médios de temperatura são levemente maiores durante o primeiro semestre de cada ano, tendo uma pequena redução dessa média no semestre de estiagem, tendo esse comportamento (levemente maior durante período chuvoso – levemente menor durante período seco) de forma constante nos anos analisados.

5.1.5 Sólidos dissolvidos totais e condutividade elétrica

A Figura 19 compila os gráficos gerados pelos dados de sólidos dissolvidos totais e condutividade elétrica no período estudado.

Figura 19 – Variação dos parâmetros: (a) sólidos dissolvidos totais; (b) condutividade elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A concentração de sólido dissolvidos apresentou valor máximo em 2015.2, no reservatório Santo Antônio de Russas (6347 mg L^{-1}), valor esse muito superior aos demais resultados. O mínimo foi registrado em 2018.1 em Itaúna ($49,4 \text{ mg L}^{-1}$). Apresentou um coeficiente de variação máximo de 169,3% em 2015.2, decorrente da presença do elevado valor de SDT nesse período.

Dos 1024 resultados para esse parâmetro, apenas 149 estão acima do limite estabelecido pela CONAMA 357/2005 (VMP = 500 mg L^{-1} de sólidos dissolvidos), correspondendo a 14,55% dos dados (BRASIL, 2005). Todos os valores médios de SDT para cada período no gráfico foram inferiores a 500 mg L^{-1} .

Altas concentrações de sólidos dissolvidos totais podem indicar que o corpo hídrico se apresenta com alta salinidade e elevado nível de poluição (Bhutiani *et al.*, 2016; Titilawo *et al.*, 2019).

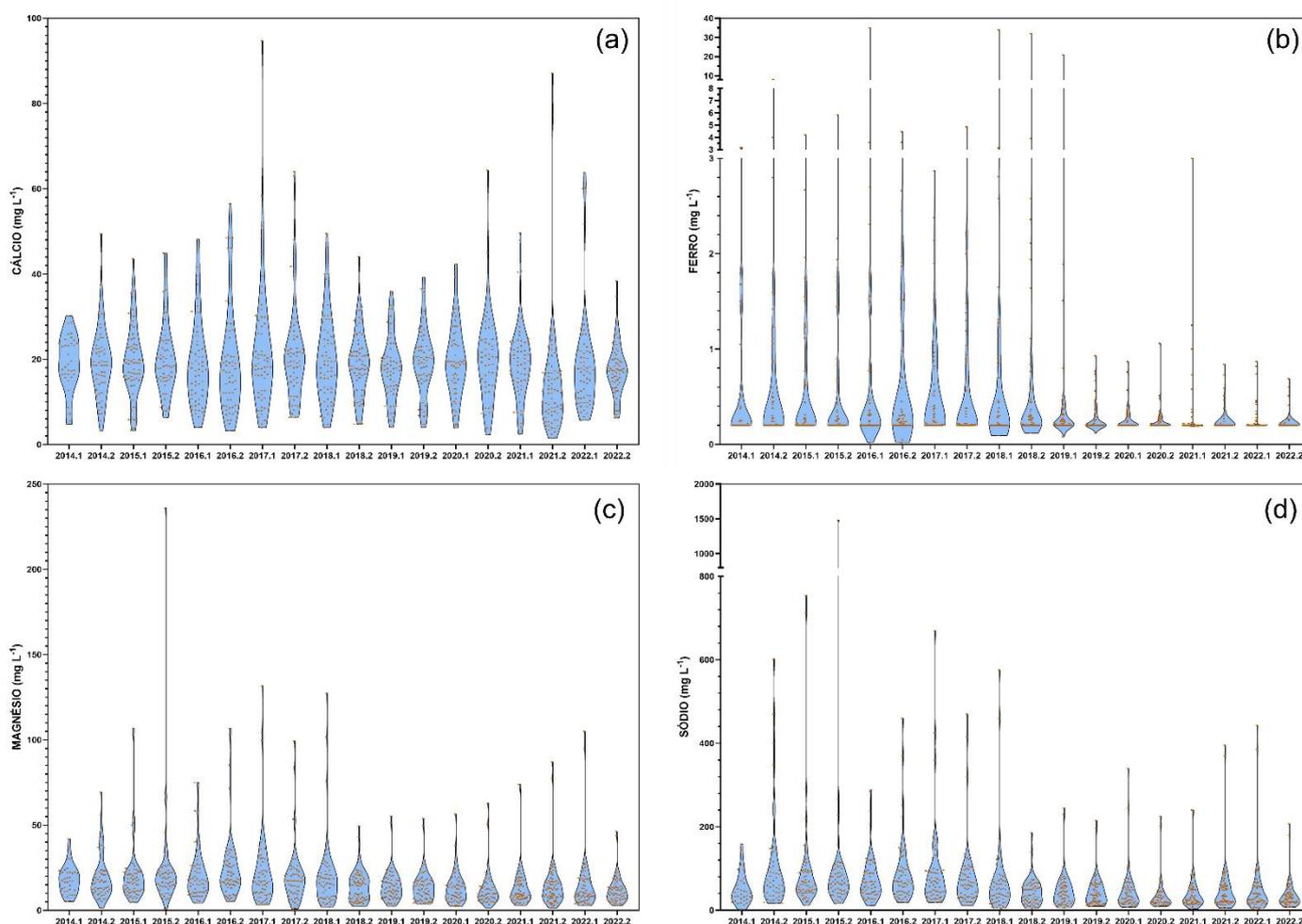
Quanto ao parâmetro condutividade elétrica, os valores máximos e mínimos registrados foram $9870 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ e $15,45 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente. No semestre 2015.2, houve a leitura máxima no reservatório Santo Antônio de Russas e leitura mínima em 2019.2 no

reservatório Taquara. O coeficiente de variação máximo também foi registrado em 2015.2 (CV = 160.5%), devido ao elevado valor de condutividade medida.

5.1.6 Íons metálicos e cloreto

A Figura 20 contém as medidas para os íons metálicos no período estudado.

Figura 20 – Variação dos parâmetros: (a) cálcio; (b) ferro; (c) magnésio; (d) sódio



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por se tratar de um mesmo grupo de espécies químicas (íons metálicos), foram agrupados em uma única figura para acompanhar o comportamento de todos. Observa-se na tabela 5 compilado os dados de estatística descritiva para esses parâmetros.

Tabela 5 – Dados de estatística descritiva para os íons metálicos

	CONC. MÍNIMA (mg L ⁻¹)	CONC. MÁXIMA (mg L ⁻¹)	CONC. MÉDIA (mg L ⁻¹)	CV MÁX (%)
CÁLCIO	1,46 (2021.2)	94,73 (2017.1)	19,37±10,21	95,41 (2021.2)
FERRO	0,02 (2014.2)	35,00 (2016.1)	0,55±3,18	409,5 (2019.1)
MAGNÉSIO	1,45 (2020.2)	236,1 (2015.2)	17,41±16,57	131,2 (2015.2)
SÓDIO	2,0 (2014.1)	1481 (2015.2)	63,25±85,57	196,7 (2018.1)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Grande parte dos valores registrados de cálcio foram centrados na faixa de 15 – 30 mg L⁻¹. Apesar disso, alguns resultados mais elevados conferem a esse parâmetro uma amplitude maior nos dados e consequentemente, um coeficiente de variação maior.

Pela observação do gráfico e do conjunto de dados para o parâmetro ferro, destaca-se a ocorrência de valores extremamente elevados, destoando do comportamento geral observado para essa variável (faixa de concentração 0,02 – 2,0 mg L⁻¹). Pela Resolução CONAMA 357/2005, o VMP para ferro é de 0,3 mg L⁻¹ (BRASIL, 2005). Para esse estudo, foi identificado que 27,7% dos resultados foram superiores ao VMP.

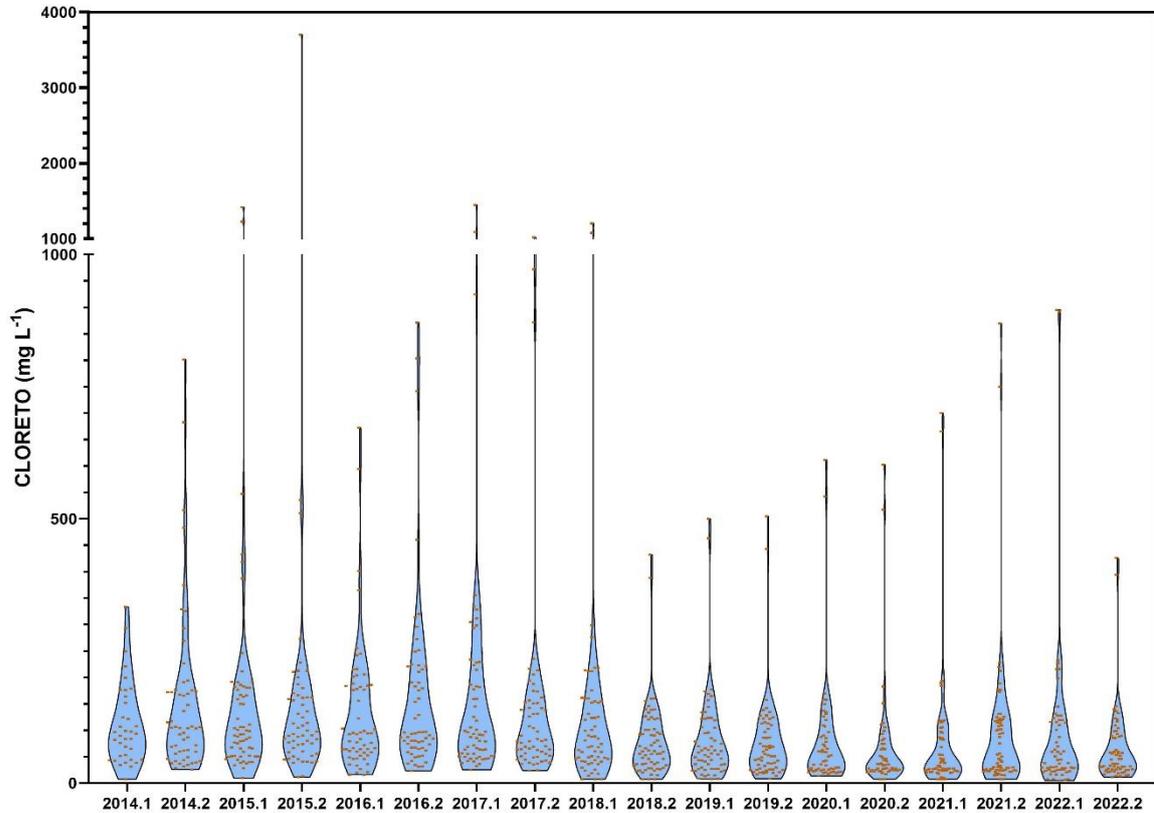
Para o magnésio, a maioria dos dados medidos estão na faixa 5 – 30 mg L⁻¹. O valor máximo observado, por ter sido registrado apenas uma vez no período de 18 semestres, possivelmente foi uma medida atípica, não representando como uma característica intrínseca aos reservatórios estudados.

Quanto ao parâmetro sódio, houve comportamento de distribuição dos resultados de forma semelhante ao magnésio. Maior parte dos resultados compreendidos na faixa de 5 - 100 mg L⁻¹, com uma medida mais elevada (1481 mg L⁻¹) no mesmo período registrado com os dados de magnésio.

Tendo como destaque essas duas elevadas medidas em 2015.2, pode-se comparar com o observado nos dados de SDT (Figura 19 (a)) no mesmo período. Indicando que as elevadas concentrações registradas contribuíram para o alto valor de SDT nesse semestre.

Os dados do parâmetro cloreto são ilustrados pela Figura 21.

Figura 21 – Variação do cloreto nos reservatórios estudados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em 2015.1, houve a maior medição de cloreto: 1418 mg L^{-1} , ocorrido no reservatório Santo Antônio de Russas (Bacia Baixo Jaguaribe), valor esse muito além do resultado médio para esse parâmetro ($114,62 \text{ mg L}^{-1}$). Para esse mesmo período houve uma elevada amplitude nos dados, refletindo no coeficiente de variação ($CV = 261,4\%$). O valor mínimo registrado foi de $7,35 \text{ mg L}^{-1}$ (2018.1), no reservatório Jaburu II.

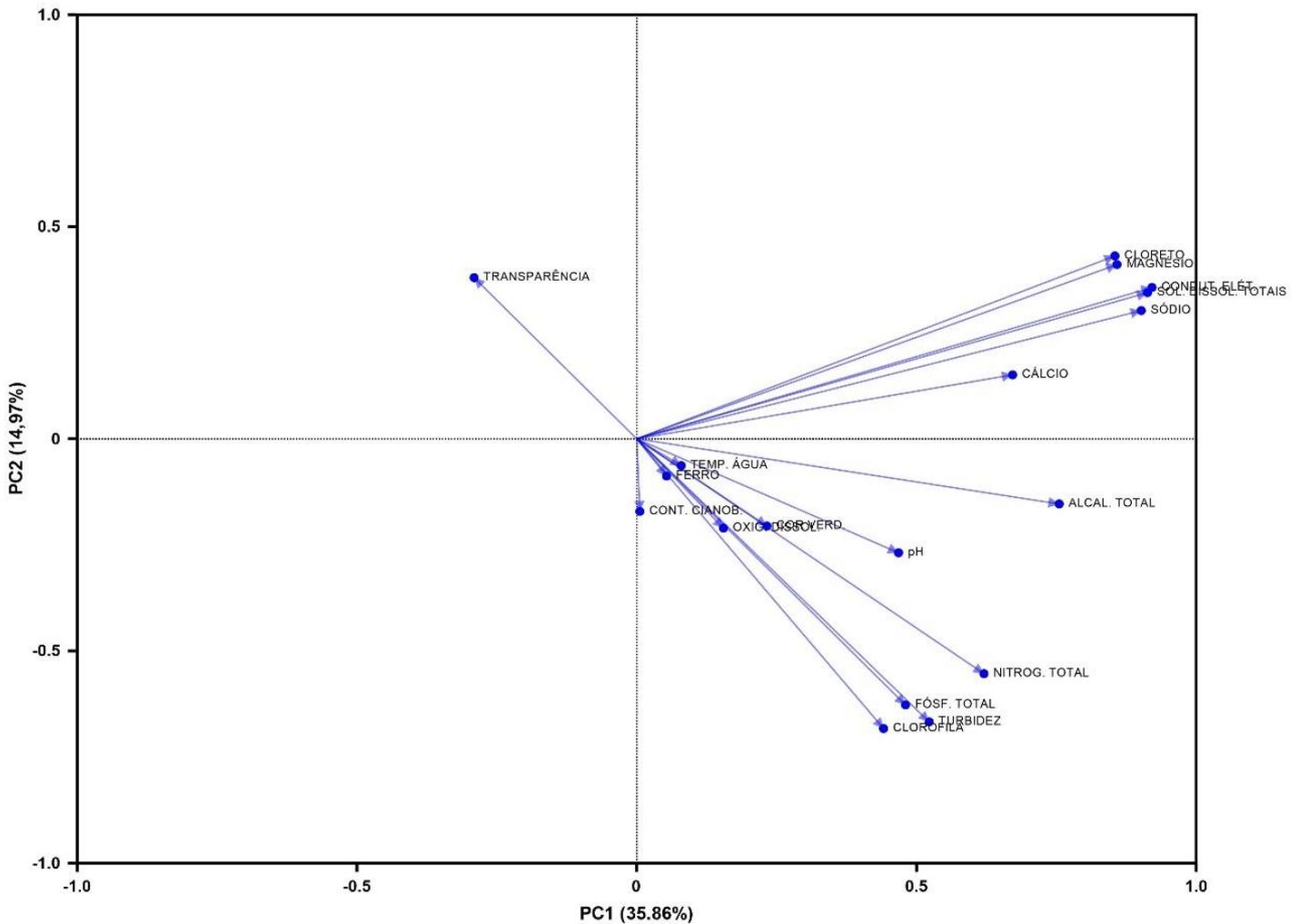
Os resultados tem se mostrado mais frequentes na faixa de concentração $20 - 250 \text{ mg L}^{-1}$. O comportamento gráfico (e da distribuição dos resultados) tem aspecto semelhante ao presente nos dados de magnésio e sódio, tanto os aspectos de valores máximos, quanto a distribuição dos resultados ao longo dos semestres. Há indícios de possível correlação entre esses parâmetros, sendo avaliado isso posteriormente na pesquisa.

5.2 Correlação entre os parâmetros e proposta de classificação trófica

5.2.1 Avaliação multivariada dos dados – Análise de Componentes Principais

Pela ferramenta estatística PCA, pode-se reduzir o número de parâmetros necessários a um grande conjunto de dados, a depender da intensidade expressa desses nos autovalores e da componente principal que se relacionam. Sendo possível também observar e identificar alguns grupos de amostras, em função dos parâmetros analisados por essa ferramenta. As Figuras 22 e 23 apresentam, respectivamente, o gráfico de loadings e o gráfico biplot (scores e loadings) para os dados desse trabalho.

Figura 22 – Gráfico de loadings (variáveis) para os dados



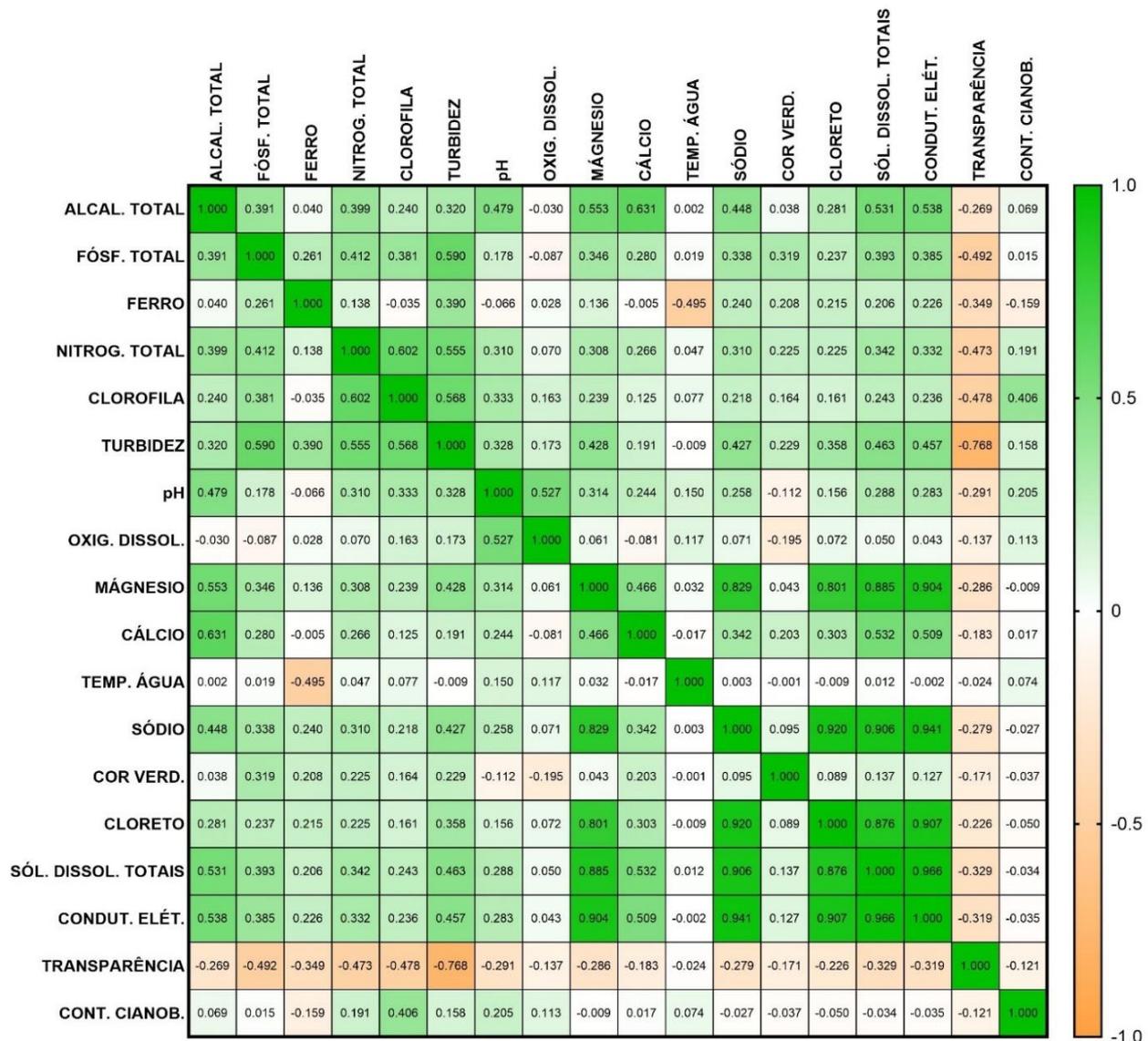
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observando no gráfico biplot, que apresenta o comportamento das amostras perante os dados tratados das variáveis, juntamente com a representação das variáveis no gráfico, percebe-se que a grande parte das amostras encontra próxima ao centro do gráfico (eixo 0;0 das componentes principais). Esse comportamento é um indicativo que a maioria das amostras são igualmente influenciadas pelas variáveis estudadas, não se observando um comportamento diferenciado para as amostras ou formação de vários grupos segregados.

Apesar disso, pode-se observar que os dados amostrais da Bacia Banabuiú apresentaram certa proximidade à direita do gráfico, sendo destacados dos demais. Os parâmetros cloreto, magnésio, sódio, cálcio, SDT e condutividade elétrica foram os principais responsáveis por essa diferenciação. Isso indica que valores elevados dessas variáveis são comumente obtidos em amostras da Bacia Banabuiú.

5.2.2 Correlação multiparamétrica

Com exceção do parâmetro pH, todos os demais não apresentaram normalidade em sua distribuição (dados não-paramétricos), aspecto frequentemente observado em análise de dados ambientais variados e com elevada amplitude (Sabino; Lage; Almeida, 2014). Diante desse teste, o coeficiente de Spearman (r_s) se apresenta como o indicador de correlação mais adequado para o estudo desses parâmetros, sendo retratado suas múltiplas correlações na Figura 24.

Figura 24 – Matriz de correlação (*heat-map*) para os parâmetros

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Desconsiderando a diagonal principal (que representa a correlação da própria variável com seus dados, por isso $|r_s|=1,0$), outras correlações também apresentaram valores significativos entre os parâmetros.

Casos como alcalinidade x pH tiveram o coeficiente de Spearman positivo e com “força” moderada ($r_s = 0,479$), de acordo com os critérios considerados nesse trabalho (tabela 4). Essa correlação já era prevista, sabendo que o equilíbrio das espécies que conferem alcalinidade a água é afetado pelo pH do meio, como também observado em outros trabalhos da literatura, como Sudhakaran *et al.* (2020), De Borba *et al.* (2021) e Seben *et al.* (2021).

Alguns íons metálicos também apresentaram correlações previamente esperadas com outras variáveis: com a medida de sólidos dissolvidos totais (magnésio $r_s = 0,885$; cálcio $r_s = 0,532$; sódio $r_s = 0,906$) e a condutividade elétrica (magnésio $r_s = 0,904$; cálcio $r_s = 0,509$; sódio $r_s = 0,941$). Pela própria definição desses dois parâmetros, a medida de SDT é maior conforme mais espécies químicas estão dissolvidas no corpo d'água analisado. Esses íons possuem alta solubilidade, acarretando no aumento do SDT registrado (Lima *et al.*, 2015). De forma semelhante para a condutividade elétrica, que é afetada pelas espécies carregadas dissolvidas na água, como íons citados o são. Por consequência dessas características, também se observa uma elevada correlação positiva entre este parâmetro e SDT ($r_s = 0,966$), corroborado por resultados obtidos em reservatórios do semiárido piauiense (Sousa; Espindola; Silva, 2020).

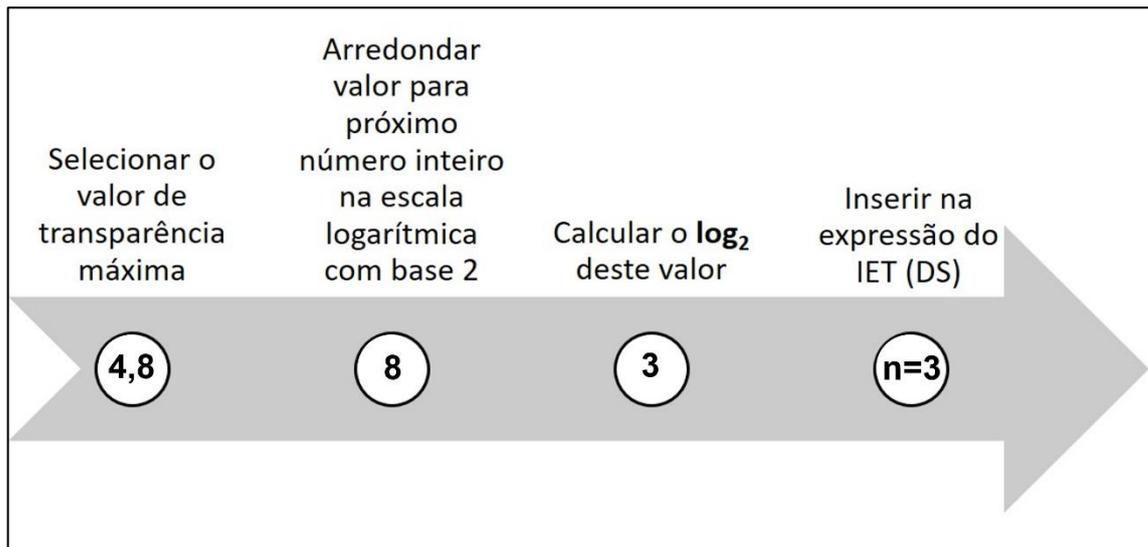
Quanto ao parâmetro clorofila, teve uma correlação significativa com a contagem de cianobactérias ($r_s = 0,406$). Esse resultado obtido corrobora com a importância de avaliar esse pigmento como parte do processo de eutrofização, devido sua frequente associação a biomassa fitoplanctônica (Gonzalez-Rodriguez *et al.*, 2017; Lima, 2019).

Diferente dos exemplos citados anteriormente, o parâmetro transparência apresentou valores de correlação negativos, mas também significativos para estudo desse trabalho. Essas correlações serão mais apresentadas na discussão futura acerca do Índice de Estado Trófico.

5.2.3 Transparência e IET

O maior valor de transparência da água registrado no período em estudo foi de 4,8 metros, ocorrido no reservatório Pentecoste (Bacia do Curu), em outubro de 2015. Seguindo a sequência de ações descritas na metodologia, obtêm-se a relação da transparência e IET, na Figura 25 apresentada.

Figura 25 – Fluxograma de etapas para construção do IET(DS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

$$\text{IET (DS)} = 10.(3 - \log_2 \text{DS}) \quad (3)$$

Sendo: IET (DS) = Índice de Estado Trófico em função da transparência; DS = transparência (m); \log_2 = logaritmo em base 2.

No trabalho de Carlson (1977), a transparência máxima foi de 41,6 metros, valor este bem diferente da realidade comumente encontrada nos reservatórios cearenses. Para as futuras construções das expressões, será utilizada a seguinte expressão, modificada da equação (3).

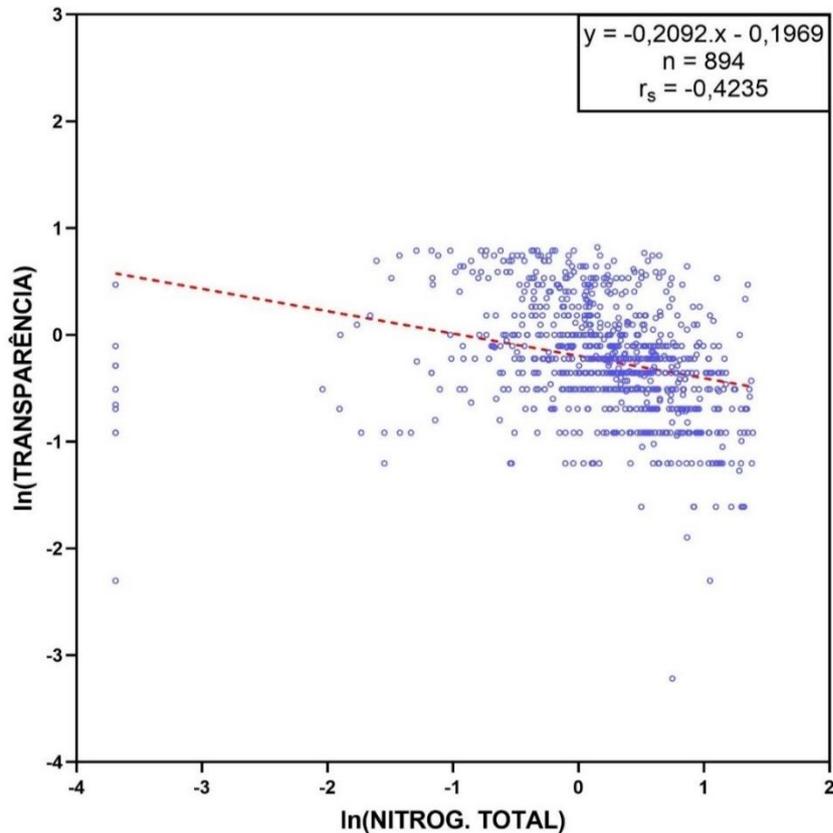
$$\text{IET (DS)} = 10.[3 - (\ln \text{DS}/\ln 2)] \quad (4)$$

Sendo: IET (DS) = Índice de Estado Trófico em função da transparência; DS = transparência (m); \ln = logaritmo natural.

5.2.3.1 Correlação transparência e nitrogênio total

Na Figura 26, o gráfico com a correlação observada no período em estudo para todas as bacias.

Figura 26 – Correlação entre nitrogênio total (NT) e transparência (DS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O comportamento observado na distribuição dos dados indicou tendência de correlação negativa, sendo confirmado pelo coeficiente de correlação apresentado ($r_s = -0,4235$)

Barros (2013), em estudo realizado com dados de reservatórios do semiárido cearense no período de 2009 a 2012, obteve resultados similares ao deste trabalho. Para o conjunto de dados do 1º e 2º semestre de sua pesquisa, obteve $r = -0,40$ e $r = -0,47$, respectivamente.

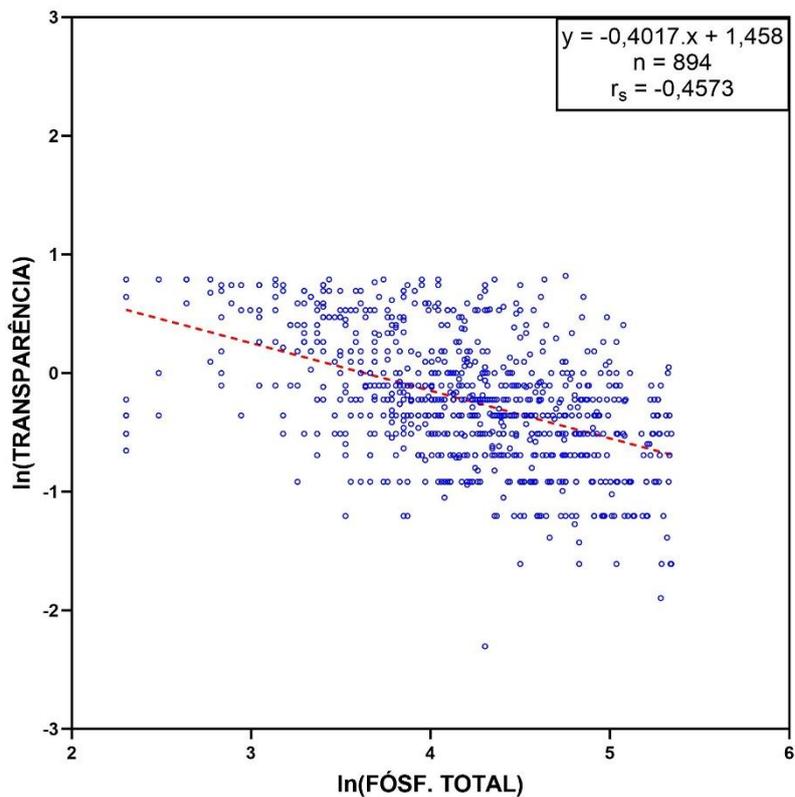
A seguinte equação será utilizada futuramente na elaboração do índice:

$$\ln(\text{DS}) = -0,2092.\ln(\text{NT}) - 0,1969 \quad (5)$$

5.2.3.2 Correlação transparência e fósforo total

A correlação para fósforo total está apresentada pela Figura 27.

Figura 27 – Correlação entre fósforo total (PT) e transparência (DS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Entre os parâmetros limnológicos comumente associados ao processo de eutrofização (nitrogênio, fósforo e clorofila), a correlação disposta para fósforo total e transparência apresentou o maior valor (em módulo), cujo $r_s = -0,4573$.

Pela discussão quanto ao nutriente limitante, o fósforo apresentou relevância para o desenvolvimento microbiológico na maioria dos reservatórios, sendo reafirmado isto pela correlação obtida. A relação entre transparência e fósforo total é melhor observada quando este nutriente é o limitante no crescimento dos organismos na água (Carlson, 1977).

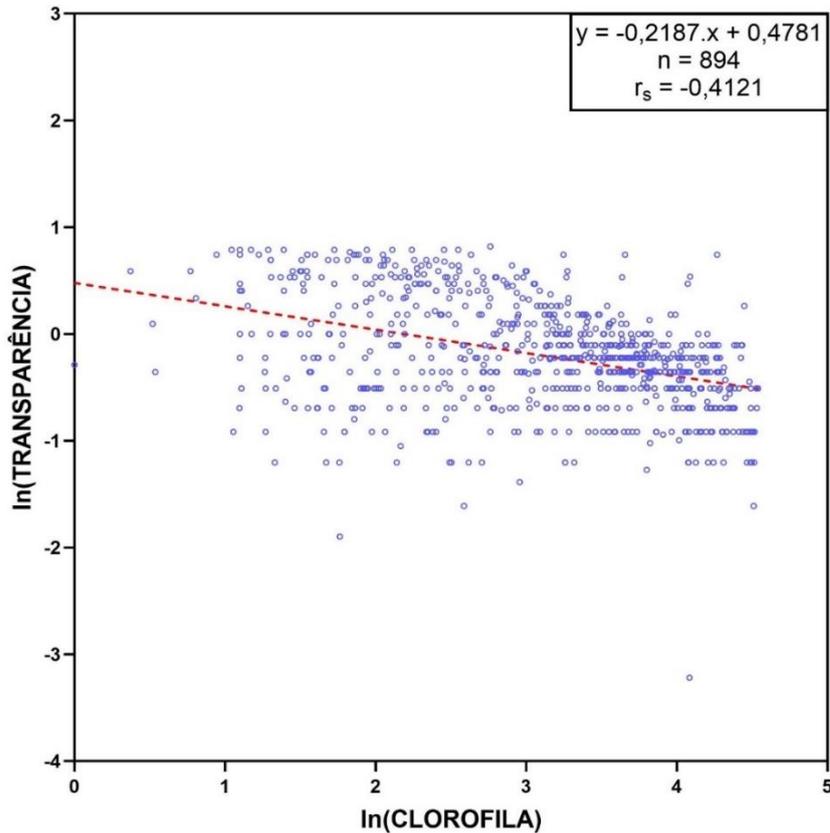
A equação que será utilizada para construção do índice é:

$$\ln(\text{DS}) = -0,4017.\ln(\text{PT}) + 1,458 \quad (6)$$

5.2.3.3 Correlação transparência e clorofila *a*

O gráfico com os dados dessa correlação é apresentado pela Figura 28.

Figura 28 – Correlação entre clorofila *a* (CHL) e transparência (DS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Estudos nacionais realizados em regiões de clima subtropical apresentaram uma correlação muito mais forte, comparada ao observado na região de clima semiárido ($r_s = -0,4121$). Lamparelli (2004) e Cunha (2013), em seus estudos com amostras de São Paulo obtiveram coeficiente de correlação 0,94 e 0,72, respectivamente. Essa diferença observada quanto a localização dos reservatórios e seus resultados enfatizam ainda mais importância de estudos que englobem dados da região local e suas particularidades geológicas e climáticas (Salas; Martino, 1991).

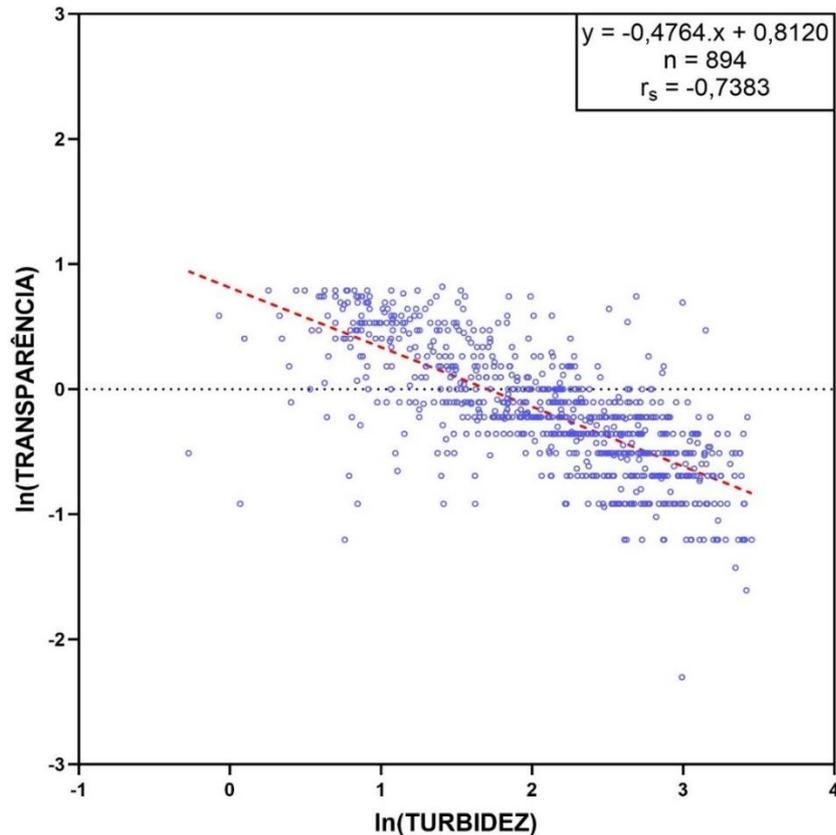
Neste tópico de clorofila *a* e transparência, equação que será utilizada é:

$$\ln(\text{DS}) = -0,2187 \cdot \ln(\text{CHL}) + 0,4781 \quad (7)$$

5.2.3.4 Correlação transparência e turbidez

Os dados para estes parâmetros estão computados na Figura 29.

Figura 29 – Correlação entre turbidez (TURB) e transparência (DS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Entre as correlações associadas ao parâmetro transparência, o valor do coeficiente de Spearman junto ao parâmetro turbidez ($r_s = -0,7383$) foi o que apresentou maior valor (em módulo). Em termos práticos, era esperado que esses parâmetros tivessem alguma relação de forma inversa, sabendo que a medida da profundidade observável no corpo hídrico é influenciada pelas substâncias presentes e material disperso na água.

Observando a matriz de correlação (Figura 24), tem-se que para o par turbidez x clorofila há uma correlação positiva, significativa e forte ($r_s = 0,568$). Isso é um indicativo que a turbidez registrada nos reservatórios é oriunda de biomassa algal (normalmente associada a clorofila *a*). Esse tipo de relação também foi observado em estudo realizado com dados do reservatório Pentecoste ($r = 0,971$), da Bacia do Curu (Souza *et al.*, 2018).

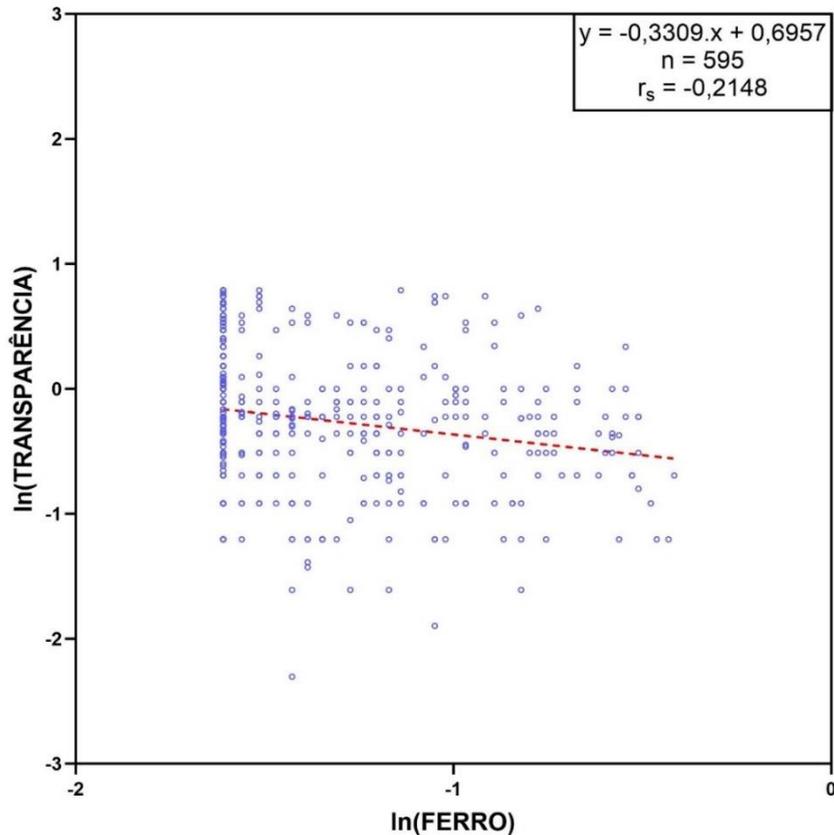
A equação de turbidez irá compor a expressão final do IET, da seguinte forma.

$$\ln(\text{DS}) = -0,4764 \cdot \ln(\text{TURB}) + 0,8120 \quad (8)$$

5.2.3.5 Correlação transparência e ferro

A correlação para a medida de ferro é apresentada pela Figura 30.

Figura 30 – Correlação entre ferro e transparência (DS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A correlação entre esses parâmetros não apresentou valores inferiores a -0,3, indicando nessa situação uma possível correlação fraca entre ferro e transparência, quando se refere as medidas transformadas por **ln** (logaritmo neperiano). No estudo com esses parâmetros, ausência de dados e a grande presença de valores registrando o limite de quantificação para as medidas de ferro podem ter contribuído para que a correlação gráfica e de Spearman fosse baixa. Devido a isso, o parâmetro ferro não será utilizado na composição da expressão do IET.

5.2.4 Expressões na composição do novo IET

Foram selecionadas as equações que apresentaram correlação moderada ou superior ($r > 0,3$) para compor essa classificação. Assim, serão utilizadas as equações que correlacionam a transparência com nitrogênio total, fósforo total, clorofila *a* e turbidez.

Pela substituição das equações (5), (6), (7) e (8) na equação (4), obtém-se as expressões individuais para Índice de Estado Trófico, em função de cada parâmetro:

$$\text{IET(NT)} = 10 \cdot \left\{ 3 - \frac{[-0,2092 \cdot \ln(\text{NT}) - 0,1969]}{\ln(2)} \right\} \quad (9)$$

$$\text{IET(PT)} = 10 \cdot \left\{ 3 - \frac{[-0,4017 \cdot \ln(\text{PT}) - 1,458]}{\ln(2)} \right\} \quad (10)$$

$$\text{IET(CHL)} = 10 \cdot \left\{ 3 - \frac{[-0,2187 \cdot \ln(\text{CHL}) + 0,4781]}{\ln(2)} \right\} \quad (11)$$

$$\text{IET(TURB)} = 10 \cdot \left\{ 3 - \frac{[-0,4764 \cdot \ln(\text{TURB}) + 0,8120]}{\ln(2)} \right\} \quad (12)$$

Sendo: NT = concentração de nitrogênio total (mg L^{-1}); PT = concentração de fósforo total ($\mu\text{g L}^{-1}$); CHL = concentração de clorofila *a* ($\mu\text{g L}^{-1}$); TURB = medida de turbidez (NTU); ln = logaritmo natural.

Para classificação trófica dos reservatórios, propõe-se a utilização do IET médio para considerar a contribuição de cada parâmetro nessa definição da classificação. Os parâmetros aqui utilizados apresentaram mesma direção e amplitude semelhante, conforme o gráfico de loadings (Figura 23), indicando que contribuem na mesma proporção, sem precisar atribuir peso a um ou outro parâmetro. O IET médio é indicado pela equação (13).

$$\text{IET}_{\text{MÉDIO}} = \frac{\text{IET(NT)} + \text{IET(PT)} + \text{IET(CHL)} + \text{IET(TURB)}}{4} \quad (13)$$

A Tabela 6 contempla os valores correspondentes a cada estado trófico, juntamente com as faixas de concentrações indicativas para cada parâmetro analisado. As concentrações das faixas apresentadas foram definidas pelo percentil para cada estado trófico, a partir do conjunto de dados de cada parâmetro.

Tabela 6 – Proposta de classificação do IET e valores de referência de cada parâmetro

Estado Trófico	Valor do IET médio	N-total (mg L^{-1})	P-total ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Clorofila ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Turbidez (NTU)
Oligotrófico	$\text{IET} \leq 29,72$	$\text{NT} \leq 0,74$	$\text{PT} \leq 39$	$\text{CHL} \leq 8,33$	$\text{TURB} \leq 3,54$
Mesotrófico	$29,72 < \text{IET} \leq 32,36$	$0,74 < \text{NT} \leq 1,101$	$39 < \text{PT} \leq 57$	$8,33 < \text{CHL} \leq 18,82$	$3,54 < \text{TURB} \leq 6,88$
Eutrófico	$32,36 < \text{IET} \leq 34,39$	$1,101 < \text{NT} \leq 1,538$	$57 < \text{PT} \leq 79$	$18,82 < \text{CHL} \leq 33,65$	$6,88 < \text{TURB} \leq 11,29$
Supereutrófico	$34,39 < \text{IET} \leq 36,31$	$1,538 < \text{NT} \leq 2,103$	$79 < \text{PT} \leq 116$	$33,65 < \text{CHL} \leq 56,21$	$11,29 < \text{TURB} \leq 17,10$
Hipereutrófico	$\text{IET} > 36,31$	$\text{NT} > 2,103$	$\text{PT} > 116$	$\text{CHL} > 56,21$	$\text{TURB} > 17,10$

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A descrição das características nos corpos hídricos para cada estado trófico é semelhante ao que é utilizado pela Agência Nacional de Águas (Tabela 7), excetuando-se pela existência da classificação ultraoligotrófica, não abordada na proposta deste trabalho.

Tabela 7 – Estados tróficos e respectivas características nos corpos hídricos

Estado Trófico	Características
Oligotrófico	Corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes.
Mesotrófico	Corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos.
Eutrófico	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos.
Supereutrófico	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios florações de algas, e interferências nos seus múltiplos usos
Hipereutrófico	Corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Fonte: Adaptado de ANA (2022).

5.3 Comparação entre diferentes IET e o proposto nesta pesquisa

A fim de compreender as diferenças e similaridades do que é proposto neste trabalho e os demais índices para avaliação do processo de eutrofização, foi compilado as faixas de classificação trófica para cada modelo de IET, com seus respectivos parâmetros e concentrações (Tabela 8).

Tabela 8 – Faixas de concentração dos parâmetros e do IET médio em cada modelo

		IET MÉDIO	PT ($\mu\text{g L}^{-1}$)	CHL ($\mu\text{g L}^{-1}$)	NT (mg L^{-1})	TURB (NTU)
Ultraoligotrófica	Toledo	$\text{IET} \leq 24$	$\text{PT} \leq 6,6$	$\text{CHL} \leq 0,5$	-	-
	Lamparelli	$\text{IET} \leq 47$	$\text{PT} \leq 8$	$\text{CHL} \leq 1,17$	-	-
	Cunha	$\text{IET} \leq 51,1$	$\text{PT} \leq 15,9$	$\text{CHL} \leq 2$	-	-
	Este trabalho	-	-	-	-	-
Oligotrófica	Toledo	$24 < \text{IET} \leq 44$	$6,6 < \text{PT} \leq 26,5$	$0,5 < \text{CHL} \leq 3,8$	-	-
	Lamparelli	$27 < \text{IET} \leq 52$	$8 < \text{PT} \leq 19$	$1,17 < \text{CHL} \leq 3,24$	-	-
	Cunha	$51,1 < \text{IET} \leq 53,1$	$15,9 < \text{PT} \leq 23,8$	$2 < \text{CHL} \leq 3,9$	-	-
	Este trabalho	$\text{IET} \leq 29,7$	$\text{PT} \leq 39$	$\text{CHL} \leq 8,33$	$\text{NT} \leq 0,74$	$\text{TURB} \leq 3,54$
Mesotrófica	Toledo	$44 < \text{IET} \leq 54$	$26,5 < \text{PT} \leq 53$	$3,8 < \text{CHL} \leq 10,3$	-	-
	Lamparelli	$52 < \text{IET} \leq 59$	$19 < \text{PT} \leq 52$	$3,24 < \text{CHL} \leq 11,03$	-	-
	Cunha	$53,1 < \text{IET} \leq 55,7$	$23,8 < \text{PT} \leq 36,7$	$3,9 < \text{CHL} \leq 10$	-	-
	Este trabalho	$29,7 < \text{IET} \leq 32,4$	$39 < \text{PT} \leq 57$	$8,33 < \text{CHL} \leq 18,82$	$0,74 < \text{NT} \leq 1,10$	$3,54 < \text{TURB} \leq 6,88$
Eutrófica	Toledo	$54 < \text{IET} \leq 74$	$53 < \text{PT} \leq 211,9$	$10,3 < \text{CHL} \leq 76,1$	-	-
	Lamparelli	$59 < \text{IET} \leq 63$	$52 < \text{PT} \leq 120$	$11,03 < \text{CHL} \leq 30,55$	-	-
	Cunha	$55,7 < \text{IET} \leq 58,1$	$36,7 < \text{PT} \leq 63,7$	$10 < \text{CHL} \leq 20,2$	-	-
	Este trabalho	$32,4 < \text{IET} \leq 34,4$	$57 < \text{PT} \leq 79$	$18,82 < \text{CHL} \leq 33,65$	$1,10 < \text{NT} \leq 1,54$	$6,88 < \text{TURB} \leq 11,29$
Supereutrófica	Toledo	-	-	-	-	-
	Lamparelli	$63 < \text{IET} \leq 67$	$120 < \text{PT} \leq 233$	$30,55 < \text{CHL} \leq 69,05$	-	-
	Cunha	$\text{IET} > 58,1$	$\text{PT} > 63,7$	$\text{CHL} > 20,2$	-	-
	Este trabalho	$34,4 < \text{IET} \leq 36,3$	$79 < \text{PT} \leq 116$	$33,65 < \text{CHL} \leq 56,21$	$1,54 < \text{NT} \leq 2,10$	$11,29 < \text{TURB} \leq 17,10$
Hipereutrófica	Toledo	$\text{IET} > 74$	$\text{PT} > 211,9$	$\text{CHL} > 76,1$	-	-
	Lamparelli	$\text{IET} > 67$	$\text{PT} > 233$	$\text{CHL} > 69,5$	-	-
	Cunha	-	-	-	-	-
	Este trabalho	$\text{IET} > 36,3$	$\text{PT} > 116$	$\text{CHL} > 56,11$	$\text{NT} > 2,10$	$\text{TURB} > 17,10$

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

(-) Dado não existente

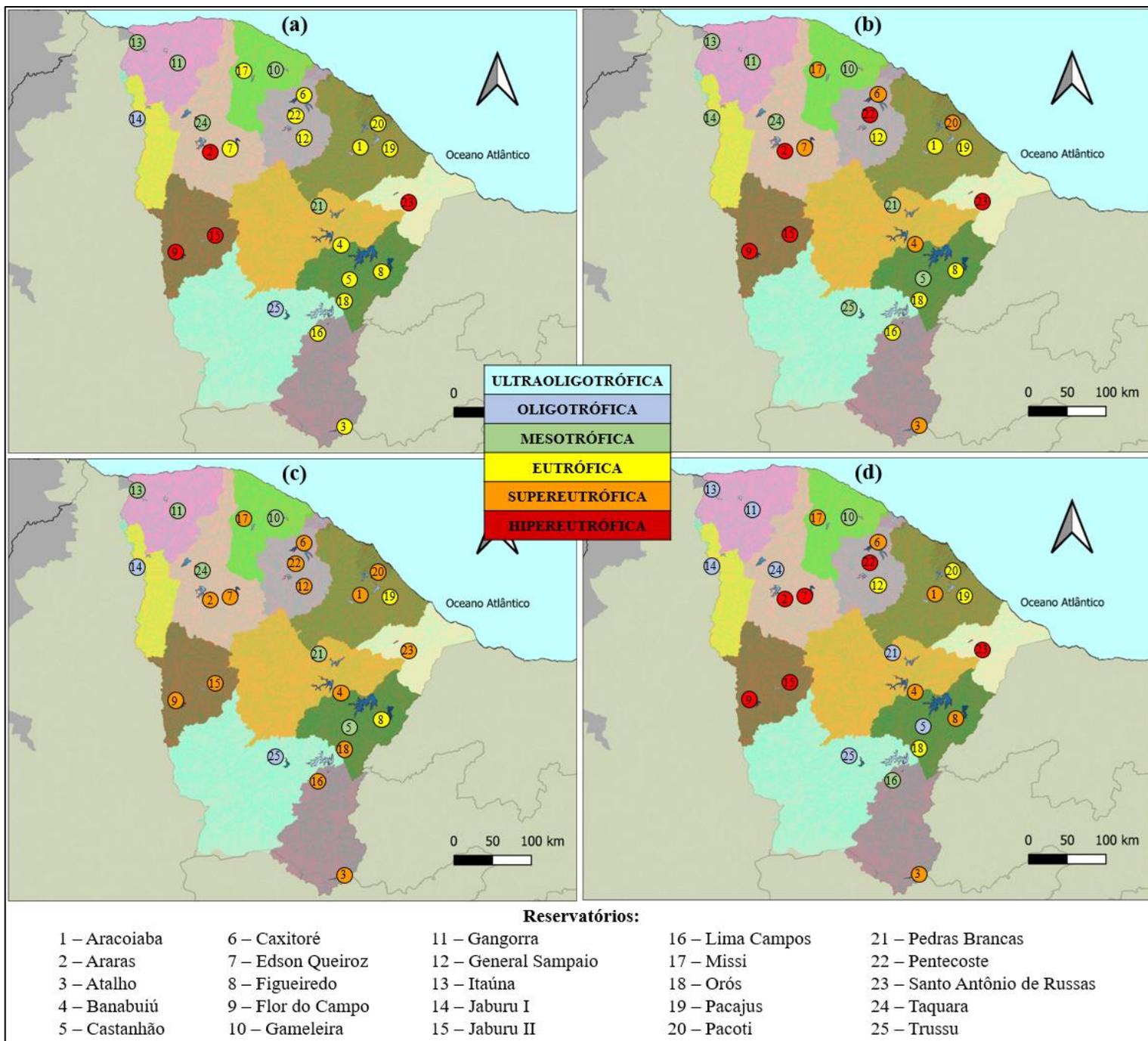
O novo índice proposto apresenta faixa de concentração de fósforo total de 39 – 116 $\mu\text{g L}^{-1}$ para a mudança das classificações tróficas. O valor mínimo para essa mudança de classe (oligo/meso) é superior aos outros índices, sendo mais de três vezes superior ao mínimo indicado por Lamparelli (2004). A concentração superior desse nutriente na faixa de trabalho é

muito menos que o dos outros modelos (aprox. metade do valor indicado por Toledo Jr. (1990), Lamparelli (2004) e Cunha (2003)).

Quanto a faixa concentração de clorofila *a* ($8,33 - 56,11 \mu\text{g L}^{-1}$), o limite inferior se apresenta maior que os demais para classe oligotrófica, sendo pouco mais permissivo a variação para essa classificação. Enquanto o limite superior da faixa apresenta concentração similar ao registrado por Toledo Jr. (1990) e Lamparelli (2004).

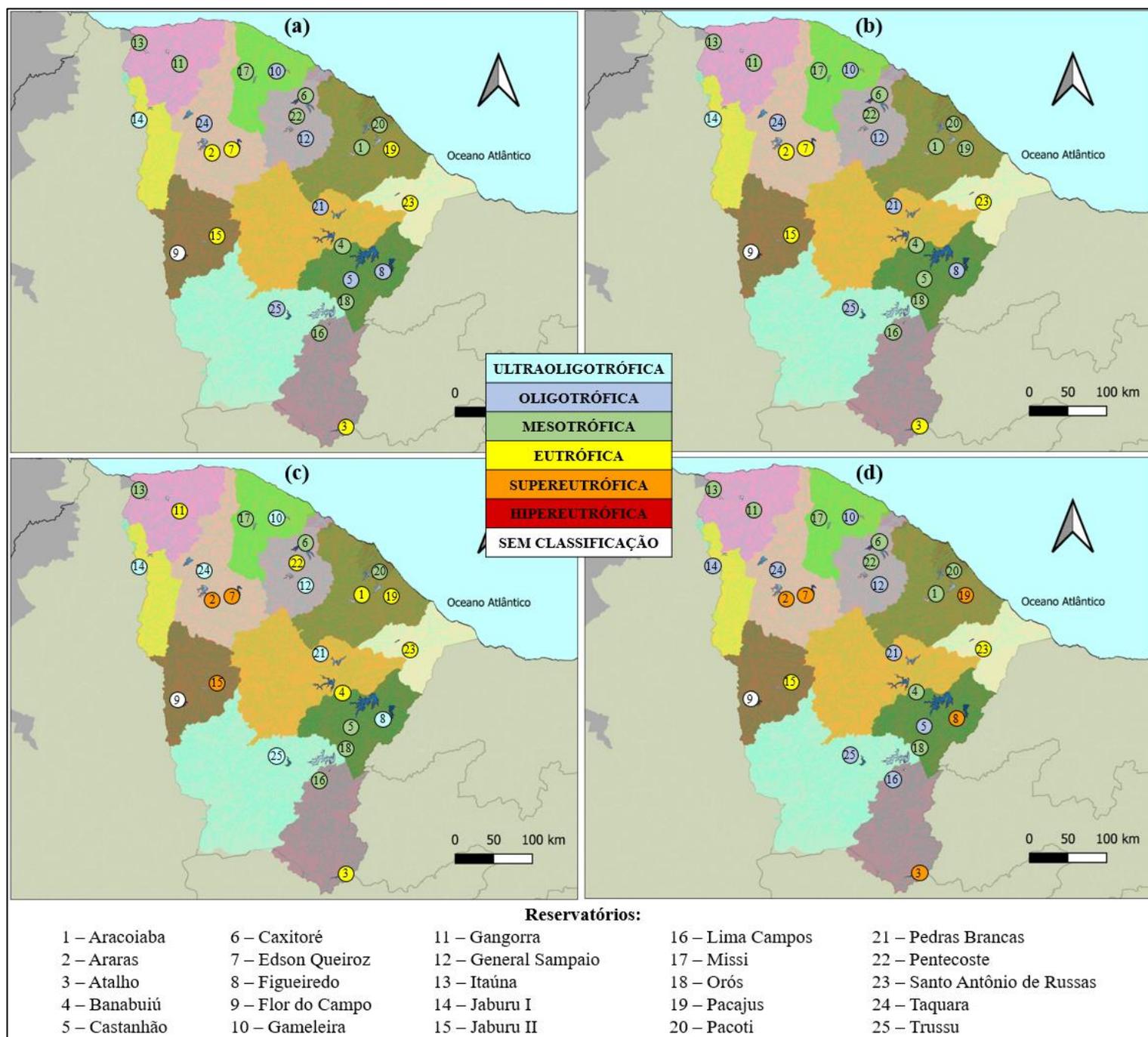
De modo complementar, foi calculado o IET para os 25 reservatórios estudados nesse trabalho, nos anos de 2015 e 2018, utilizando as expressões desenvolvidas por Toledo Jr. (1990), Lamparelli (2004), Cunha (2003) e por este trabalho. Os dados completos utilizados no cálculo das expressões desses IETs estão dispostos nos Apêndices A e B. Os resultados desses índices estão presentes nas figuras 31, 32, 33 e 34, expressos nos mapas temáticos quanto a classificação trófica, adaptados do mapa apresentado na metodologia (figura 4).

Figura 31 – Classificação trófica dos reservatórios estudados (em 2015.1), segundo IET proposto por: (a) Toledo Jr; (b) Lamparelli; (c) Cunha; (d) este trabalho.



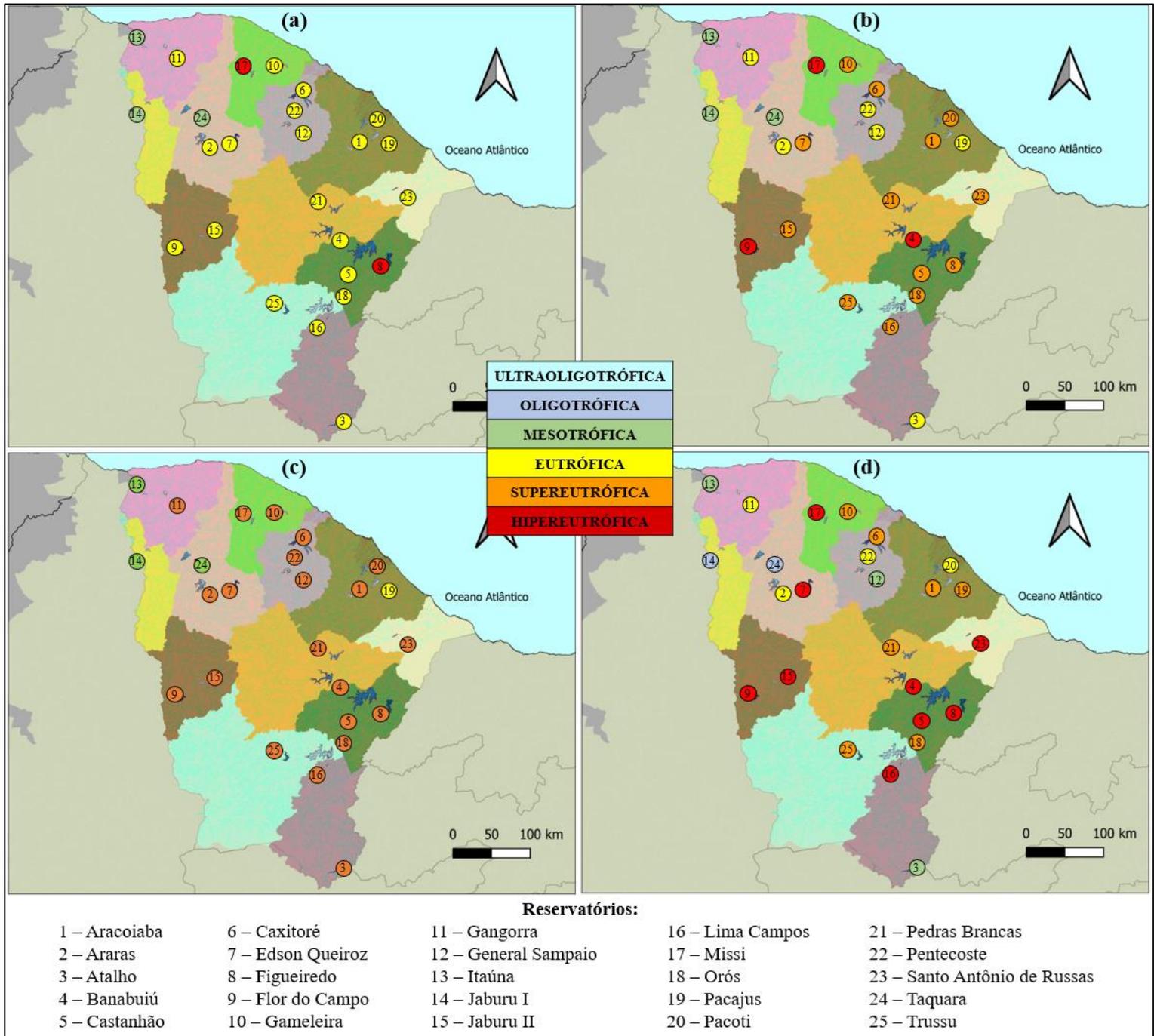
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 32 – Classificação trófica dos reservatórios estudados (em 2015.2), segundo IET proposto por: (a) Toledo Jr; (b) Lamparelli; (c) Cunha; (d) este trabalho.



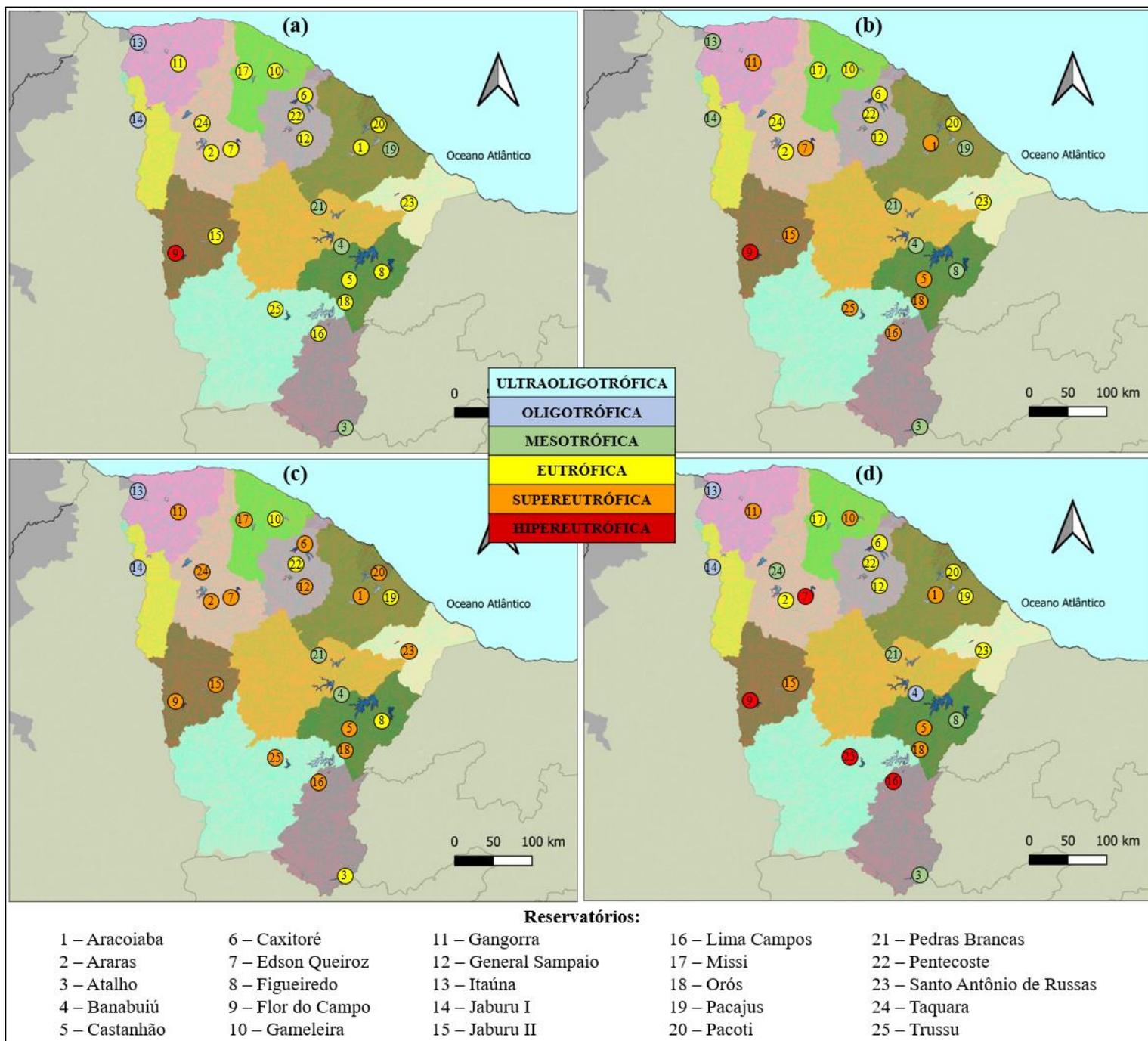
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 33 – Classificação trófica dos reservatórios estudados (em 2018.1), segundo IET proposto por: (a) Toledo Jr; (b) Lamparelli; (c) Cunha; (d) este trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 34 – Classificação trófica dos reservatórios estudados (em 2018.2), segundo IET proposto por: (a) Toledo Jr; (b) Lamparelli; (c) Cunha; (d) este trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os três índices já existentes aplicados apresentaram classificação trófica muito semelhante. Em especial, o índice elaborado nesse trabalho, quando comparado aos demais, obteve resultados similares quanto a classificação trófica, havendo em alguns casos uma diferenciação de apenas um nível trófico, sendo superior (reservatório Atalho/2015.2) ou inferior (reservatório Itaúna/2015.1).

Pelo IET deste presente trabalho, foi observado uma maior ocorrência de reservatórios com classificação super/hipereutrófico no primeiro semestre de cada ano avaliado (período chuvoso). Em 2015.1, 48% dos resultados se apresentaram nessa faixa super/hiper, enquanto em 2015.2 houve apenas 20% dos reservatórios com essa classificação. De maneira semelhante, 2018.1 teve 64% dos corpos hídricos avaliados em classificação supereutrófica ou superior e no semestre seguinte (2018.2), houve uma redução para 40% dos reservatórios nesse estado trófico.

Essa diferenciação pode ser decorrente da pluviosidade mais frequente nos primeiros meses do ano. Essas chuvas contribuem com a renovação da água presente nos reservatórios, ocasionando também o revolvimento de substâncias depositadas no fundo dos corpos hídricos, além de carrear outros materiais presentes próximo a margem desses reservatórios, pela ação da chuva. Isso traz uma nova dinâmica de processos físicos, químicos e biológicos ao corpo d'água, tendo como consequência o aumento dos parâmetros associados a produtividade no local.

6 CONCLUSÃO

A maioria dos parâmetros estudados apresentaram um dinamismo variado nos reservatórios, não havendo uma tendência ou comportamento constante ao longo dos anos avaliados. Entre essas variáveis, destacam-se o pH e a temperatura, com coeficientes de variação mais baixo, possuindo medidas com pouca variabilidade nesse estudo.

Importante salientar que alguns parâmetros foram comparados com as informações presentes na Resolução CONAMA 357/2005 (valor máximo permitido), sendo constatado que praticamente todas as medidas de fósforo e contagem de cianobactérias estão em desacordo com a Resolução em vigor.

Pelo conjunto de dados dos nutrientes nitrogênio e fósforo, identificou-se que o fósforo tem atuado como principal nutriente limitante no desenvolvimento das espécies aquáticas, ocorrendo limitação por fósforo em torno de 80% dos reservatórios, seguido pela ocorrência de colimitação (nitrogênio e fósforo) nos reservatórios.

As análises estatísticas realizadas colaboraram com a identificação de correlações entre os parâmetros deste trabalho, por meio de ferramentas como Análise de Componentes Principais (PCA) e coeficiente de Spearman (r_s), apresentando resultados significativos para compreensão das relações entre as variáveis.

Foi elaborado um Índice de Estado Trófico, baseado em correlações estatísticas, composto por parâmetros já frequentemente utilizados na literatura (fósforo e clorofila *a*) e outros novos e pouco abordados (nitrogênio e turbidez), como especulado nas hipóteses deste trabalho. A comparação feita deste trabalho com outros índices já existentes mostrou similaridade em algumas classificações e nas faixas de concentração, com a ocorrência de poucos casos com classificação muito distinta.

A ocorrência de resultados diferentes para a classificação trófica dos reservatórios traz uma boa característica ao índice proposto: se houvesse alta similaridade, este índice não precisaria existir, já que os demais já existentes poderiam realizar as classificações de forma contundente; se houve uma alta diferenciação, este índice poderia ter sido elaborado de forma errônea, não sendo representativo da região em estudo. Obtêm-se dessa afirmação que os outros índices estudados nesse trabalho não apresentam uma classificação condizente com a situação dos reservatórios da região de clima semiárido.

REFERÊNCIAS

- ALVALÁ, Regina *et al.* Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 91, supl. 1, 2019.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Indicadores de qualidade – Índice de qualidade das águas (IQA)**. 2021. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>. Acesso em: 09 fev. 2021.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Indicadores de qualidade – Índice do estado trófico (IET)**. 2022. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>. Acesso em: 09 fev. 2022.
- ANDRADE, Eunice Maia de *et al.* Balance of nitrogen and phosphorus in a reservoir in the tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 1, 2020.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd ed., Washington DC: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 2017.
- ARAÚJO, José Carlos de. Recursos hídricos em regiões semiáridas. *In*: MEDEIROS, S. de S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. de O.; PAZ, V. P. da S. (Ed.). **Recursos hídricos em regiões semiáridas: Estudos e aplicações**. INSA- Instituto Nacional do Semiárido, 2012. p. 30-43
- ASA. Articulação Semiárido Brasileiro. **Acesso à água para as populações do Semiárido brasileiro**. 2019. Disponível em: https://www.asabrasil.org.br/images/UserFiles/File/Acesso_a_agua_para_populacoes_do_Semiario_brasileiro.pdf. Acesso em: 13 fev. 2021.
- BARBOSA, José Etham de Lucena *et al.* Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 103-118, 2012.
- BARROS, Lilian Rodolfo. **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) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- BATISTA, A. A. *et al.* Relação entre nitrogênio e fósforos nas águas do açude Orós – CE. *In*: WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS DO SEMIÁRIDO, 4., 2012, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Inovagri, 2012. p. 1-5.
- BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C. *et al.* Increase in Straight and Coiled *Cylindrospermopsis raciborekii* (Cyanobacteria) populations under conditions of thermal destratification in a shallow tropical reservoir. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 3, n. 4, p. 245-252, 2011.
- BRAGA, Gustavo Girão *et al.* Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 27, n. 1, p. 15-23, 2015.

BRANCO, E. S.; FEITOSA F. A. N.; MONTE, M. J. F. Variação sazonal e espacial da biomassa fitoplanctônica relacionada com parâmetros hidrológicos no estuário de Barra das Jangadas (Jaboatão dos Guararapes – Pernambuco – Brasil). **Tropical Oceanography**, Recife: v. 30, n. 2, p. 79-96, 2002.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos **Diário Oficial da União**, 09 de janeiro de 1997. Seção 1, nº 6. 1997.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5 – Anexo XX**, de 28 de setembro de 2017. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html. Acesso em: 21 fev. 2021.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357**, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 18 jan. 2021.

CAMPOS, José Nilson B. Paradigms and public policies on drought in Northeast Brazil: a historical perspective. **Environmental management**, v. 55, n. 5, p. 1052-1063, 2015.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes 1. **Limnology and oceanography**, v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

CARLSON, R. E. Estimating trophic state. **LakeLine**, v. 27, n. 1, p. 25-28, 2007.

CARVALHO, N. O. S. de *et al.* Crescimento inicial de plantas de licuri (*Syagrus coronata*) em diferentes níveis de luminosidade. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.3, p.351-357, 2006.

CAVALCANTE, José Fernandes *et al.* Avaliação da qualidade da água do reservatório pedras brancas através da determinação do índice de estado trófico - IET. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30º., 2019, Natal. **Anais ... Natal: ABES**, 2019.

CEARÁ. Lei nº 11.996 de 24 de julho de 1992. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos – SIGERH e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, Fortaleza, CE, 29 jul.1992.

CEARÁ. Lei nº 14.844 de 28 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos – SIGERH, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, Fortaleza, CE, 30 dez. 2010.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará**. Ceará, 2018. Disponível em: https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2018/07/PLANO-DE-ACOES-ESTRATEGICAS-DE-RECURSOS-HIDRICOS-CE_2018.pdf. Acesso em: 20 jan. 2021.

CHAFFIN, Justin D. *et al.* Accuracy of data buoys for measurement of cyanobacteria, chlorophyll, and turbidity in a large lake (Lake Erie, North America): implications for estimation of cyanobacterial bloom parameters from water quality sonde measurements. **Environmental science and pollution research**, v. 25, n. 25, p. 25175-25189, 2018.

CHORUS, I.; BARTRAM, J. **Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management**. London, New York: St. Edmundsbury Press, Suffolk, 1999.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Anuário do Monitoramento Qualitativo dos Principais Açudes do Estado do Ceará 2017**. Fortaleza. COGERH, 2018.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Ficha Técnica dos açudes**. 2023. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/ficha-tecnica-dos-acudes-158/> Acesso em: 18 jan. 2023.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Matriz de impactos ambientais dos açudes**. 2021. Disponível em: <http://cdn.funceme.br/hidro-ce/data/arquivos/Matriz%20de%20Impactos%20Ambientais%20dos%20A%C3%A7udes.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2021.

CORREIA, Paulo RM; FERREIRA, Márcia. Reconhecimento de padrões por métodos não supervisionados: explorando procedimentos quimiométricos para tratamento de dados analíticos. **Química Nova**, v. 30, p. 481-487, 2007

CUNHA, Davi Gasparini Fernandes; CALIJURI, Maria do Carmo; LAMPARELLI, Marta Condé. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSIts). **Ecological Engineering**, v. 60, p. 126-134, 2013.

DALEZIOS, Nicolas R.; ANGELAKIS, Andreas N.; ESLAMIAN, Saeid. Water scarcity management: part 1: methodological framework. **International Journal of Global Environmental Issues**, v. 17, n. 1, p. 1-40, 2018.

DE BORBA, Willian Fernando *et al.* Análise da qualidade da água de poços de monitoramento em área de disposição de resíduos sólidos urbanos no sul do Brasil. **Rev. Geociênc. Nordeste**, Caicó, v. 7, p. 306-316, 2021.

DE SOUSA, Keicyane Alves; DE ESPINDOLA, Giovana Mira; DA SILVA, Carlos Ernando. Análise de atributos limnológicos em reservatórios do semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 01, p. 357-371, 2020.

EFFLER, S. W. Attenuation versus Transparency. **Journal of Environmental Engineering**, v. 111, n. 4, p. 448-459, 1985.

EFFLER, S. W. *et al.* A Mechanistic Model for Secchi Disk Depth, Driven by Light Scattering Constituents. **Water Air Soil Pollut**, v. 228, n. 4, 2017.

ENRICH-PRAST, A. Caminhos do nitrogênio em ecossistemas aquáticos continentais. *In*: ROLAND, F.; CESAR, D.; MARINHO, M. (Orgs.). **Lições de Limnologia**. São Carlos: Rima Editora, 2005. p. 209-227.

ENVIRONMENT AGENCY. **Aquatic eutrophication in England and Wales. A proposed management strategy**. Bristol: Environment Agency, Consultative Report, 1998, 36p.

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

FEITOSA, L. S. **Aspectos Limnológicos da Pequena Açudagem no Semiárido: Estudo de Caso dos Açudes do Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE**. 2011. 130 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

FERREIRA, Kássia Crislayne Duarte *et al.* Adaptação do índice de qualidade de água da National Sanitation Foundation ao semiárido brasileiro. **Rev. Ciênc. Agron.**, Fortaleza, v. 46, n. 2, p. 277-286, 2015.

FOLLI, Gabriely Silveira *et al.* Tutorial para aplicação didática de quimiometria em software gratuito–Parte I: Análise de Componentes Principais em dados de infravermelho médio e propriedades físico-químicas de amostras de petróleo. **Revista Ifes Ciência**, v. 9, n. 1, p. 01-14, 2023.

FONSECA, C. S.; AMARAL, V. S.; NAVONI, J. A. Impacto antrópico nos recursos hídricos do estado do rio grande do norte: uma análise geoespacial de vulnerabilidade ambiental. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 46, p. 49-67, 2024.

FREIRE, Letícia Lacerda. **Variação sazonal e interanual da qualidade das águas de rios do semiárido brasileiro**. 2020. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília: FUNASA, 2014.

GLIBERT, P.M. *et al.* Modeling of HABs and eutrophication: status, advances, challenges. **Journal of Marine Systems**, v. 83, n. 3-4, p. 262-275. 2010.

GONDIM, Joaquim *et al.* A seca atual no Semiárido nordestino–Impactos sobre os recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 277-300, 2017.

GONZALEZ-RODRIGUEZ, Eliane *et al.* Biomassa fitoplanctônica e produção primária. *In*: FALCÃO, Ana Paula da Costa; MOREIRA, Daniel Leite (Eds). **Ambiente Pelágico**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. p. 69-87.

GREGOR, Jakub; MARŠÁLEK, Blahoslav; ŠÍPKOVÁ, Helena. Detection and estimation of potentially toxic cyanobacteria in raw water at the drinking water treatment plant by in vivo fluorescence method. **Water research**, v. 41, n. 1, p. 228-234, 2007.

GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D.; ELESBON, A. A. A.; RIBEIRO, C. B. M.; MATOS, A. T.; SOARES, J.H.P. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p.558-63, 2012.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. de. Análise de Componentes Principais: Resumo Teórico, Aplicação e Interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 5, ed. 1, p. 83-90, 2016.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Bacias Hidrográficas Ceará**. 2020. Disponível em: http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/pdf/Bacias_Hidrograficas_2020.pdf. Acesso em: 20 fev. 2021.

IZYDORCZYK, K. *et al.* Establishment of an alert level framework for cyanobacteria in drinking water resources by using the algae online analyser for monitoring cyanobacteria chlorophyll a. **Water Res**, v. 43, p. 989-996, 2009.

JOCHIMSEN, Elise M. *et al.* Liver failure and death after exposure to microcystins at a hemodialysis center in Brazil. **New England Journal of Medicine**, v. 338, n. 13, p. 873-878, 1998.

KARLSON, Bengt *et al.* Introduction to methods for quantitative phytoplankton analysis. **Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis**, p. 5-12, 2010.

KULSHRESHTHA, A.; SHANMUGAM, P. Estimation of Secchi Transparency in Turbid Coastal Waters. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1114-1118, 2015.

LAMPARELLI, Marta Condé. **Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. Tese (Doutorado em Ecossistema Terrestres e Aquáticos) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LAWRENZ, E.; FEDEWA, E. J.; RICHARDSON, T. L.; Extraction protocols for the quantification of phycobilins in aqueous phytoplankton extracts. **J. Appl. Phycol.** 23, 865, 2011.

LENZI, E.; FAVERO, L. O. B.; LUCHESE, E. B. **Introdução a química da água**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 2014.

LIMA, Divanesa Wojahn *et al.* Correlação dos parâmetros qualitativos da água de irrigação: um estudo de caso em reservatórios de águas superficiais. **Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão-RevInt**, v. 2, n. 1, 2015.

LIMA, Gustavo Ross Ribeiro. **Indicadores de qualidade de água nos reservatórios Acarape do Meio e Gavião**. 2019. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

LIMA, P. F. *et al.* Preliminary analysis on the use of trophic state indexes in a Brazilian semiarid reservoir. **Acta Science**, 37, 309–318, 2015.

LIND, O. T. The effect of non-algal turbidity on the relationship of Secchi depth to chlorophyll a. **Hydrobiologia**, v. 140, p. 27-35, 1986.

- MACÊDO, J. A. B. **Águas & Águas**. 3ª Ed. Belo Horizonte: CRQ – MG, 2007.
- MANKIEWICZ, JOANNA *et al.* Natural toxins from cyanobacteria. **Acta Biol Cracov Bot**, v. 45, p. 9-20, 2003.
- MARCHETTI, Mario *et al.* Retrieving visibility distance in fog combining infrared thermography, Principal Components Analysis and Partial Least-Square regression. **Infrared Physics & Technology**, v. 71, p. 289-297, 2015.
- MARENCO, José A. *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.
- MARENCO, José A. *et al.* Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *In*: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. (Eds.). **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. INSA - Instituto Nacional do Semiárido. v. 1, p. 385-422, 2011.
- MATHEUS, E. C.; GIANOTTI, E. O.; MORAES, A. J. Correlações entre Clorofila, STV e DQO. **Rev. DAE**, v. 49, n. 154, p. 20-28, 1989.
- MOSLEY, Luke M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. **Earth-Science Reviews**, v. 140, p. 203-214, 2015.
- MOURA, Magna Soelma Beserra de *et al.* Aspectos meteorológicos do Semiárido brasileiro. *In*: XIMENES, Luciano Feijão; SILVA, Maria Sonia Lopes da; BRITO, Luiza Teixeira de Lima (Eds.). **Tecnologias de convivência com o Semiárido brasileiro**. Embrapa Semiárido - Livro Técnico, 2019.
- PAERL, H.W.; JUSTIC, D. Estuarine Phytoplankton. *In*: Day, J.W.; Crump, B. C.; Kemp, W. M.; Yáñez-Arancibia, A.; (Eds), **Estuarine Ecology**, 2.ed. New Jersey: Wiley-Blackwell. 2013.
- PAN, Xiaojun *et al.* Remote sensing of picophytoplankton distribution in the northern South China Sea. **Remote Sensing of Environment**, v. 128, p. 162-175, 2013.
- PANOSSO, R. *et al.* Cianobactérias e cianotoxinas em reservatórios do Estado do Rio Grande do Norte e o potencial controle das florações pela Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). **Oecol. Bras.**, vol 11, n 3, p. 433-449, 2007.
- PAULINO, Walt Disney; OLIVEIRA, Rafael Reis Alencar; AVELINO, Francimeyre Freire. Classificação do estado trófico para o gerenciamento de reservatórios no semiárido: a experiência da COGERH no estado Ceará. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20º., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRHidro, 2013.
- PAULINO, Walt Disney; TEIXEIRA, Francisco José Coelho. A questão ambiental e a qualidade da água nas bacias hidrográficas do Nordeste. *In*: ANA- Agência Nacional de Águas. **A Questão da Água no Nordeste**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. Brasília, DF: CGEE, p. 217-246, 2012.

PEREIRA, A. C. de F.; GALO, M. de L. B. T.; VELINI, E. D. Inferência da transparência da água - reservatório de Itupararanga/SP, a partir de imagens multiespectrais ikonos e espectrorradiometria de campo. **Revista Brasileira de Cartografia** v. 63, n. 1, p. 1-12, 2011.

PÉREZ, Gabriel Roldán; RESTREPO, John Jairo Ramírez. **Fundamentos de limnología neotropical**. 2 ed. Medellín: Universidad de Antioquia, 2008.

POHLING, Rolf. **Reações químicas na análise de água**. Fortaleza: Arte Visual, 2009.

PREISENDORFER, R. W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters. **Limnology and Oceanography**, v. 31, n. 5, p. 909-926, 1986.

RABELO, Udinart Prata. **Segurança Hídrica no Ceará: Análise de Cenários e de Alternativas de Intervenção**. 2017. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

REDFIELD, Alfred C. The biological control of chemical factors in the environment. **American scientist**, v. 46, n. 3, p. 230A-221, 1958.

ROLIM, Hosineide de Oliveira *et al.* Proposal of a trophic state index in semiarid reservoirs using data of the Banabuiú Basin, state of Ceará, Brazil. **Acta Limnológica Brasiliensia**, v. 31, 2019.

ROLIM, Hosineide de Oliveira. **Proposta de índice de estado trófico em reservatórios do semiárido a partir de dados da bacia do Banabuiú, estado do Ceará**. 2016. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SABINO, Claudia Vilhena Schayer; LAGE, Ludmila Vieira; ALMEIDA, Katiane Cristina de Brito. Uso de métodos estatísticos robustos na análise ambiental. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, p. 87-94, 2014.

SALAS, H. J.; MARTINO, P. A simplified phosphorus trophic state model for warm water tropical lakes. **Water Research**, v. 25, n. 3, p. 1341 – 350, 1991.

SALAS, H. J.; MARTINO, P. **Metodologías Simplificadas Para La Evaluación De Eutroficación En Lagos Cálidos Tropicales**. Lima: CEPIS, 2001. 76p.

SALMASO, Nico *et al.* Basic guide to detection and monitoring of potentially toxic cyanobacteria. **Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis**, p. 46-69, 2016.

SALURI, Mihkel; KALDMÄE, Margit; TUVIKENE, Rando. Extraction and quantification of phycobiliproteins from the red alga *Furcellaria lumbricalis*. **Algal Research**, v. 37, p. 115-123, 2019.

SANTOS, Janaina A. *et al.* Hydrochemistry and trophic state change in a large reservoir in the Brazilian northeast region under intense drought conditions. **Journal of Limnology**, v. 76, n. 1, 2017.

SANTOS, João Paulo de Oliveira *et al.* Influência da urbanização no índice de estado trófico de um ecossistema lêntico na bacia do Rio Mamanguape, Paraíba, Brasil. **Acta Biológica Catarinense**, v. 7, n. 1, p. 113-122, 2020.

SAWYER, C.N.; McCARTY, P.L.; PARKIN, G.F. **Chemistry for Environmental Engineering and Science**. 5th edition. New York: McGraw-Hill Science, 2002. 752p.

SEBEN, Débora *et al.* Padrões de associação entre indicadores físicos, químicos e microbiológicos de nascentes do Rio Grande do Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 12., 2021, Salvador. **Anais...** Salvador: IBEAS, 2021.

SILVA, Janaína Barbosa da; DUARTE, Simone Mirtes Araújo. Intermittent rivers of the Brazilian northeast: The case of alto Paraíba, Brasil. **Ciência & Trópico**, v. 41, n. 2, p. 129-148, 2017.

SILVA, Thiago Teixeira da. **Estudo sobre as variáveis responsáveis pela eutrofização das águas dos reservatórios do semiárido cearense**. 2018. 51 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SINGH, Vijay P. Challenges in meeting water security and resilience. **Water International**, v. 42, n. 4, p. 349-359, 2017.

SMITH, V. H.; JOYE, S. B.; HOWARTH, R. M. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. **Limnology and Oceanography**, v. 51, p. 351-355, 2006.

SMITH, Val H.; SCHINDLER, David W. Eutrophication science: where do we go from here?. **Trends in ecology & evolution**, v. 24, n. 4, p. 201-207, 2009.

SOUZA FILHO, Francisco de Assis. **Estudo Setorial Especial Recursos Hídricos – CEARÁ 2050**. Fortaleza. 2018. Disponível em: <http://www.ceara2050.ce.gov.br/api/wp-content/uploads/2018/10/ceara-2050-estudo-setorial-especial-recursos-hidricos.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021.

SOUZA, S. O., *et al.* Avaliação da relação entre o índice de qualidade da água e o índice de estado trófico em reservatório do semiárido brasileiro. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 9., 2018, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBEAS, 2018.

SOUZA, W.; ATTAYDE, J. L.; ROCHA, E. The response of zooplankton assemblages to variations in the water quality of four man-made lakes in semi-arid northeastern Brazil. **Journal of Plankton Research**, v. 30, n. 6, p. 699-708, 2008.

STREIT, Nivia Maria *et al.* The chlorophylls. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do Semiárido**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiariadorelatorionv.pdf> Acesso em: 30 jan. 2023.

SUDHAKARAN, Sandhya *et al.* A multivariate statistical approach in assessing the quality of potable and irrigation water environs of the Netravati River basin (India). **Groundwater for sustainable development**, v. 11, p. 100462, 2020.

TABARELLI, Marcelo *et al.* Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 4, p. 25-29, 2018.

TOLEDO JR, A. P. **Informe preliminar sobre os estudos para a obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais**. São Paulo, SP: CETESB, 1990. 12 p.

TSOLA, Stephania L. *et al.* Size-fractionated chlorophyll a and phycoerythrin temporal variations in a highly eutrophic lake and its isolated karstic springs. **Oceanological and Hydrobiological Studies**, v. 47, n. 2, p. 118-127, 2018.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; GALLI, C. S. **Eutrofização na América do Sul: causas, consequências e tecnologias para gerenciamento e controle**. 1. ed. São Carlos: DMD Propaganda, 2006.

VON SPERLING, E. Uso de relações limnológicas para avaliação da qualidade da água em mananciais de abastecimento. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2000, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2000. p. 1-3.

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

WANG, H. *et al.* TN:TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes. **Fresh-water Biology**, v. 53, p. 935–944. 2008.

WEBER-SCANNELL, Phyllis K.; DUFFY, Lawrence K. Effects of total dissolved solids on aquatic organism: a review of literature and recommendation for salmonid species. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2007.

WIEGAND, Mário César *et al.* Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability. **Journal of Arid Environments**, v. 184, p. 104321, 2021.

WORLEY, B.; HALOUSKA, S.; POWERS, R. Utilities for quantifying separation in PCA/PLS-DA scores plots. **Analytical Biochemistry**, v. 433, n. 2, p. 102–104, 2013.

XAVIER, Christine da Fonseca. **Avaliação da influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba – Paraná**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

XIAO, Chengwei *et al.* Using Spearman's correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, v. 28, n. 14, p. 3866-3878, 2016.

ZANELLA, Maria Elisa. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 36, p. 126-142, 2014.

APÊNDICE A – DADOS PARA ELABORAÇÃO DOS MAPAS COM CLASSIFICAÇÃO TRÓFICA EM 2015

	2015.1								2015.2							
	PT ($\mu\text{g L}^{-1}$)	CHL ($\mu\text{g L}^{-1}$)	NT (mg L^{-1})	TURB (NTU)	IET _T	IET _L	IET _C	IET _P	PT ($\mu\text{g L}^{-1}$)	CHL ($\mu\text{g L}^{-1}$)	NT (mg L^{-1})	TURB (NTU)	IET _T	IET _L	IET _C	IET _P
ARACOIABA	55	58,3	1,575	16,1	62,94 E	62,71 E	59,77 S	34,93 S	14	60,08	1,488	8,3	52,95 M	58,53 M	56,99 E	31,74 M
ARARAS	164	169	1,18	21,1	76,15 H	68,63 H	63,90 S	37,60 H	14	139,12	3	23	57,63 E	60,78 E	58,63 S	34,77 S
ATALHO	58	73,69	0,86	15,43	64,49 E	63,44 S	60,30 S	34,66 S	9	148,06	2,512	34,4	54,55 E	59,51 E	57,80 E	34,70 S
BANABUIÚ	95	41,68	1,08	12	65,20 E	63,54 S	60,27 S	34,67 S	8,8	54,47	1,862	15,6	49,38 M	56,99 M	55,95 E	32,29 M
CASTANHÃO	87	2,84	0,76	1,48	51,09 M	56,69 M	55,25 M	28,56 O	10	12,82	1,037	2,84	43,12 O	53,86 M	53,62 M	27,98 O
CAXITORE	98	72,84	1,59	12,6	68,22 E	65,00 S	61,34 S	35,53 S	6,3	44,89	0,55	12,5	45,99 M	55,50 M	54,92 M	30,35 M
EDSON QUEIROZ	100	130,53	3,01	17,7	71,29 E	66,50 S	62,43 S	37,08 H	12	142,92	4,28	30,1	56,20 E	60,19 E	58,25 S	35,21 S
FIGUEIREDO	123	8,5	0,96	35,4	59,09 E	60,42 E	57,93 E	35,56 S	13	-	1,65	58	33,16* O	49,77* O	51,01* U	34,71 S
FLOR DO CAMPO	287	61,91	2,03	25,3	75,15 H	67,86 H	63,22 S	38,34 H	-	-	-	-	-	-	-	-
GAMELEIRA	112	1,84	0,46	8,5	50,74 M	56,39 M	54,98 M	31,21 M	3,4	4,31	0,45	2,44	29,80 O	47,89 O	49,45 U	24,65 O
GANGORRA	33	-	0,19	5,42	47,17* M	55,65* M	54,94* M	29,98 O	6,7	80,05	3,825	9,3	49,34 M	57,11 M	56,09 E	31,86 M
GENERAL SAMPAIO	78	24,21	0,76	8,23	61,05 E	61,61 E	58,89 S	33,04 E	7,7	4,06	0,425	21,6	35,40 O	50,22 O	51,00 U	29,50 O
ITAÚNA	29	-	0,13	8,65	45,30* M	54,86* M	54,41* M	29,43 O	5,7	53,6	2,61	14,2	46,16 M	55,63 M	55,04 M	31,74 M
JABURU I	20	3,78	0,7	1,57	41,92 O	52,93 M	52,80 O	26,69 O	2,9	1,45	1,65	2,91	23,19 U	44,73 U	47,17 U	24,85 O
JABURU II	401	150,77	1,01	44	82,03 H	71,06 H	65,50 S	39,95 H	41	68,35	2,57	16,1	61,68 E	62,24 E	59,49 S	35,01 E
LIMA CAMPOS	37	52,25	0,62	3,17	59,53 E	61,24 E	58,77 S	30,77 M	5,8	35,15	0,31	9,48	44,17 M	54,65 M	54,32 M	29,13 O
MISSI	92	86,29	2,82	13,2	68,61 E	65,23 S	61,52 S	36,08 S	11	26,31	1,312	8,5	47,00 M	55,74 M	54,99 M	30,67 M
ORÓS	73	37,46	1,3	9,71	62,76 E	62,48 E	59,55 S	33,98 E	6,5	33,64	1,612	8,63	44,77 M	54,89 M	54,47 M	30,35 M
PACAJUS	54	16,55	0,888	15,26	56,49 E	59,56 E	57,46 E	33,38 E	58	11,84	2,06	28,22	55,26 E	58,93 M	56,99 E	34,90 S
PACOTI	132	45,48	0,506	4,09	68,01 E	64,75 S	61,09 S	32,79 E	6,5	57,94	1,281	12,72	47,50 M	56,22 M	55,45 M	31,27 M

PEDRAS BRANCAS	26	4,47	0,58	0,93	44,66 M	54,14 M	53,63 M	26,16 O	2,7	4,22	1,312	1,74	28,03 O	47,14 O	48,95 U	24,53 O
PENTECOSTE	192	87,54	2,02	22,4	73,99 E	67,49 H	63,03 S	37,82 H	10	55,54	0,412	27,9	50,39 M	57,42 M	56,24 E	32,35 M
SNT.ANT. DE RUSSAS	165	129,98	1,52	19,7	74,88 H	68,00 H	63,44 S	37,47 H	20	68,99	4,01	13,6	56,30 E	59,98 E	57,98 E	33,97 E
TAQUARA	31	6,92	0,2	2,49	48,11 M	55,74 M	54,77 M	27,65 O	2,7	5,39	0,55	2,33	29,26 O	47,74 O	49,39 U	24,57 O
TRUSSU	17	4,21	0,025	1,02	41,29 O	52,70 M	52,66 O	23,29 O	2,5	4,58	2,012	2,9	27,88 O	47,10 O	48,94 U	25,68 O

IET_T = Valor IET médio segundo Toledo Jr; IET_L = Valor IET médio segundo Lamparelli;

IET_C = Valor IET médio segundo Cunha; IET_P = Valor IET médio segundo o presente trabalho.

U = Ultraoligotrófica; O = Oligotrófica; M = Mesotrófica; E = Eutrófica; S = Supereutrófica; H = Hipereutrófica

(-) Dado indisponível

(*) Calculado sem todos os termos da expressão de IET médio.

APÊNDICE B – DADOS PARA ELABORAÇÃO DOS MAPAS COM CLASSIFICAÇÃO TRÓFICA EM 2018

	2018.1								2018.2							
	PT ($\mu\text{g L}^{-1}$)	CHL ($\mu\text{g L}^{-1}$)	NT (mg L^{-1})	TURB (NTU)	IET _T	IET _L	IET _C	IET _P	PT ($\mu\text{g L}^{-1}$)	CHL ($\mu\text{g L}^{-1}$)	NT (mg L^{-1})	TURB (NTU)	IET _T	IET _L	IET _C	IET _P
ARACOIABA	82	77,43	1,688	17,8	67,24 E	64,61 S	61,09 S	35,96 S	75	52,33	1,713	15,1	64,63 E	63,38 S	60,20 S	35,25 S
ARARAS	85	33,46	1,45	4,77	63,29 E	62,66 E	59,65 S	32,97 E	64	28,16	1,1	5,51	60,38 E	61,38 E	58,77 S	32,46 E
ATALHO	77	41,75	0,363	5,73	63,69 E	62,91 E	59,85 S	32,27 M	34	18,96	0,788	3,5	53,83 M	58,50 M	56,78 E	30,20 M
BANABUIÚ	169	99,3	4,225	75,2	73,70 E	67,41 H	63,00 S	40,37 H	60	3,69	1,413	2,4	49,73 M	56,20 M	54,97 M	29,53 O
CASTANHÃO	190	56,14	1,715	22,25	71,69 E	66,37 S	62,21 S	37,32 H	154	28,46	1,513	13,52	66,77 E	64,07 S	60,56 S	35,52 S
CAXITORÉ	110	55,61	2,1	12,7	67,70 E	64,69 S	61,09 S	35,71 S	57	30,04	1,49	9,07	59,87 E	61,19 E	58,65 S	33,43 E
EDSON QUEIROZ	115	117,77	2,188	16,3	71,78 E	66,67 S	62,53 S	36,82 H	88	107,85	2,438	16,4	69,41 E	65,64 S	61,83 S	36,46 H
FIGUEIREDO	304	26,37	1,238	17,97	71,29 E	65,94 S	61,79 S	36,79 H	67	9,11	1,163	6,01	55,05 E	58,75 M	56,82 E	31,83 M
FLOR DO CAMPO	272	62,03	1,838	13,7	74,78 H	67,70 H	63,11 S	37,13 H	574	285,9	4,875	107,98	87,82 H	73,71 H	67,38 S	43,70 H
GAMELEIRA	82	88,33	2,212	13,5	67,90 E	64,94 S	61,33 S	35,79 S	64	17,04	2,35	17,4	57,86 E	60,15 E	57,86 E	34,61 S
GANGORRA	49	38,79	1,213	9,76	60,06 E	61,36 E	58,80 S	33,38 E	39	104,98	2,25	18,1	63,40 E	63,11 S	60,14 S	35,36 S
GENERAL SAMPAIO	87	18,87	1,113	3,85	60,59 E	61,33 E	58,66 S	31,98 M	66	29,84	1,375	7,56	60,89 E	61,62 E	58,93 S	33,26 E
ITAÚNA	54	3,81	0,55	17,9	49,13 M	55,96 M	54,82 M	32,14 M	27	2,24	0,7	6,47	41,46 O	52,56 M	52,46 O	29,15 O
JABURU I	47	3,68	0,763	2,49	47,95 M	55,46 M	54,47 M	28,77 O	24	3,17	0,875	1,24	42,35 O	53,05 M	52,85 O	26,58 O
JABURU II	426	26	1,125	31,9	73,65 E	66,93 S	62,45 S	38,18 H	236	15,84	1,062	9,79	66,91 E	63,92 S	60,36 S	34,86 S
LIMA CAMPOS	149	64,29	2	15,6	70,61 E	65,97 S	61,96 S	36,58 H	99	59,05	2,225	24,56	67,24 E	64,52 S	60,98 S	36,78 H
MISSI	204	107,16	2,313	13,1	75,44 H	68,17 H	63,52 S	37,24 H	47	55,99	1,338	7,81	61,60 E	62,13 E	59,38 S	33,30 E
ORÓS	138	32,69	1,8	15,6	66,67 E	64,08 S	60,59 S	35,85 S	115	60,94	2,3	15	68,48 E	65,05 S	61,34 S	36,20 S
PACAJUS	155	6,01	0,901	37,2	59,02 E	60,27 E	57,77 E	35,66 S	90	4,71	0,7	14,8	53,87 M	58,03 M	56,23 E	32,90 E
PACOTI	120	25,4	1,1	6,31	64,40 E	63,03 S	59,85 S	33,52 E	41	40,08	1,288	6,31	58,94 E	60,90 E	58,50 S	32,45 E

PEDRAS BRANCAS	73	82,44	3,488	11,4	66,71 E	64,42 S	60,97 S	35,62 S	31	9,89	2,075	3,93	49,91 M	56,62 M	55,42 M	30,48 M
PENTECOSTE	161	13,33	0,788	10,9	63,29 E	62,34 E	59,28 S	34,13 E	64	20,25	1,4	8,61	58,73 E	60,57 E	58,17 E	33,15 E
SNT.ANT. DE RUSSAS	265	22,01	2,25	34,13	69,39 E	65,08 S	61,19 S	38,00 H	64	25,85	1,78	7,79	59,95 E	61,17 E	58,61 S	33,35 E
TAQUARA	42	5,61	0,7	2,16	49,25 M	56,15 M	55,01 M	28,63 O	27	85,44	0,737	3,69	59,72 E	61,49 E	59,02 S	31,10 M
TRUSSU	64	40,29	1,8	18	62,18 E	62,26 S	59,41 S	35,15 S	97	68,73	2,525	19,4	67,85 E	64,83 S	61,22 S	36,56 H

IET_T = Valor IET médio segundo Toledo Jr; IET_L = Valor IET médio segundo Lamparelli;

IET_C = Valor IET médio segundo Cunha; IET_P = Valor IET médio segundo o presente trabalho.

U = Ultraoligotrófica; O = Oligotrófica; M = Mesotrófica; E = Eutrófica; S = Supereutrófica; H = Hipereutrófica