Variações no Índice Estado Trófico em Águas de três reservatórios no Ceará: resultados de uma estiagem prolongada

Changes in the Trophic State Index in Waters from three reservoirs in Ceará: Results of a prolonged dry season

Data de entrada: 31/05/2022
Data de aprovação: 04/11/2025

Andreza Dnarla Oliveira Santos[1]* | Thales Henrique Silva Costa[1]
Fernando José de Araújo da Silva[1] | Ana Barbara de Araújo Nunes[1]

DOI: https://doi.org/10.36659/dae.2026.123

Santos ADO https://orcid.org/0000-0003-1765-9269
Costa THS https://orcid.org/0000-0001-9637-1604
Silva FJA https://orcid.org/0000-0002-3260-8876
Nunes ABA https://orcid.org/0000-0001-5845-6252

Resumo

No semiárido brasileiro, a qualidade da água nos reservatórios sofre acentuada degradação devido à eutrofização artificial. Isso limita seus usos múltiplos, com impacto especial sobre os sistemas de abastecimento humano. O estado do Ceará concentra um número significativo de reservatórios (247 ao todo) na região, que tem passado por um período de estiagem prolongada (2012 a 2016). Isso torna ainda mais premente o monitoramento e a manutenção da qualidade das águas reservadas. Nesse sentido, o presente estudo buscou avaliar o Índice de Estado Trófico (IET) em três reservatórios localizados no semiárido cearense (Arneiroz II, Adauto Bezerra e Castanhão), no período de 2012 a 2018, empregando critérios de Carlson, Cunha, Calijuri e Lampareli e Pavluk e Bij de Vaate. Os resultados dos IETs para os reservatórios indicaram a perda de qualidade da água acompanhada da diminuição do volume hídrico ao longo do tempo do monitoramento, os quais foram classificados, predominantemente como hipereutrófico para os três modelos aplicados. Foi identificado que o fósforo é o nutriente limitante para os reservatórios Adauto Bezerra e Castanhão, enquanto o reservatório Arneiroz II apresentou colimitação. Esse estudo evidencia que os reservatórios necessitam de intervenções que minimizem as perdas da qualidade da água, sendo o IET um indicador que pode atuar como ferramenta dessas intervenções, buscando gestão e promoção de mecanismos de controle de poluição, garantindo a qualidade para os usos múltiplos da água e maior vida útil desses sistemas.

Palavras-chave: Qualidade da Água. Semiárido. Reservatórios.

Abstract

In the Brazilian semiarid region, water quality in reservoirs is severely degraded due to artificial eutrophication. This process limits multiple uses, specially impacting water supply systems. In the region, the state of Ceará concentrates a significant number of reservoirs (247) that undergone a prolonged drought (2012 to 2016), demanding more attention regarding water quality. Thus, this study approached the trophic state index (TSI) of three reservoirs in the semiarid (Arneiroz II, Adauto Bezerra, and Castanhão). The studied period spanned from 2012 to 2018 and used models from Carlson, Cunha, Calijuri, and Lampareli and Pavluk and Bij de Vaate. The results for the TSI in the reservoirs indicated a decrease in water quality and in the water volume available in the three reservoirs. The TSI values showed a predominant hypereutrophic classification in all applied

[1] Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Fortaleza – CE – Brasil.
* **Autor correspondente:** andrezadnarla@gmail.com

models. Phosphorus configured a limiting nutrient for the Adauto Bezerra and Castanhão reservoirs, whereas Arneiroz II showed colimitation. This study showed that these reservoirs need interventions to minimize water quality deterioration and that TSI constitutes an important tool to guide potential interventions to promote pollution control mechanisms and ensure quality for multiple uses of water and the longer service life of these water systems.

Keywords: *Water Quality. Semiarid. Reservoirs.*

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno recorrente de secas na região nordeste do Brasil é caracterizado pela irregularidade anual e interanual dos totais pluviométricos, associada a altas taxas de evaporação. O caráter climático desafia técnicos e gestores quanto à elaboração de políticas públicas e a busca por ações que possibilitem não só o atendimento as necessidades básicas de subsistência, como também propiciem o desenvolvimento econômico e regional no sertão (Pereira Neto, 2017).

A construção de reservatórios, denominados regionalmente de açudes, tem sido a solução técnica mais utilizada para enfrentar a vulnerabilidade hídrica no semiárido brasileiro (Costa; Dantas, 2012). O semiárido nordestino é a região com maior densidade de reservatórios com usos múltiplos do país. As intervenções hidráulicas atendem às demandas de consumo humano, criação de animais e processos produtivos.

No estado do Ceará, a construção de açudes é datada desde 1907, com o açude Acaraú Mirim, e aplicada até os dias atuais como forma de controle e manutenção de vazão. A técnica de açudagem é particularmente importante para o Ceará, que conta com 164 municípios no semiárido (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE, 2017). Segundo dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), o Ceará possui 247 açudes construídos, que são classificados quanto à capacidade de armazenamento, como de porte macro (> 750 Hm³), de grande porte (de 75 a 750 Hm³), de médio porte (de 7,5 a 75 Hm³) e de pequeno porte (< 7,5 Hm³) (COGERH, 2015).

Com tantos reservatórios e a incerteza climática, uma preocupação destacada é o fenômeno da eutrofização, que impacta a qualidade de água. Esse evento pode ser decorrente do processo da dinâmica natural dos corpos hídricos ou da intervenção humana, eutrofização artificial, por meio do acréscimo da quantidade de nutrientes no reservatório, manifestando-se por meio do crescimento exagerado de organismos aquáticos autotróficos (Araújo; Sales; Souza, 2013).

Nesse sentido, o grau de trofia existente em um determinado ecossistema pode ser estimado a partir do Índice de Estado Trófico (IET), que representa entradas externas de nutrientes e características específicas de cada reservatório, como tempo de retenção, vazão, regime hidrológico, servindo como base para um planejamento de controle da eutrofização e uso do corpo hídrico (Maia; Carvalho; Carvalho, 2015).

Segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (2019), são vários os efeitos indesejáveis da eutrofização, entre eles: maus odores e mortandade de peixes, mudanças na biodiversidade aquática, redução na navegação e capacidade de transporte, modificações na qualidade e quantidade de peixes de valor comercial, contaminação da água destinada ao abastecimento público.

A eutrofização de mananciais destinados ao abastecimento público representa um risco relevante à saúde humana, uma vez que favorece florações de cianobactérias, comprometendo a eficiência do

tratamento e possibilitando a presença de cianotoxinas em concentrações superiores aos limites de potabilidade (Malta *et al.*, 2022).

Araújo, Mendonça e Reis (2018) destacam que, no Brasil, é crescente a preocupação com o rápido processo de degradação dos ambientes aquáticos. Os autores ressaltam que os estudos de avaliação trófica em sistemas aquáticos são prementes. Tais investigações oferecem subsídios para a elaboração de planos de manejo e gestão de ecossistemas aquáticos, por meio de estratégias que objetivam a sustentabilidade e o aumento da vida útil dos recursos hídricos (Lamparelli, 2004; Tundisi; Matsumura-Tundisi; Abe, 2008).

Nesse sentido, o presente estudo tem por objetivo avaliar e comparar as classificações de estado trófico a partir de diferentes modelos de IET, a saber: Carlson (1977), Cunha, Calijuri e Lampareli (2013) e Pavluk e Bij de Vaate (2017) em três reservatórios no semiárido cearense. Enseja-se aqui, evidenciar a relação do longo período de estiagem e a diminuição da qualidade da água reservada, com base nos resultados de IET.

2 METODOLOGIA

Este estudo foi baseado em informações originárias do monitoramento regular da qualidade da água de três reservatórios localizados no semiárido cearense. Os dados para os cálculos do IET e do volume disponível foram obtidos junto à COGERH, empresa responsável pela gestão dos recursos hídricos no estado do Ceará. O período de estudo compreendeu o segundo semestre do ano de 2012 até o primeiro semestre do ano de 2018. Foram coletadas duas amostras, nos meses de fevereiro e maio, para o primeiro semestre de cada ano, e em agosto e novembro, para o segundo semestre.

Os reservatórios do estudo, mostrados na Figura 1, foram: 1) Adauto Bezerra (E 560.036; N 9.331.456), município de Pereiro e capacidade de armazenamento de 5,25 Hm^3; 2) Arneiroz II (E 365.223; N 9.307.088), município de Arneiroz e capacidade de armazenamento de 197,06 Hm^3; e 3) Castanhão (E 560.930; N 9392711), município de Alto Santo e capacidade de armazenamento de 6700 Hm^3.

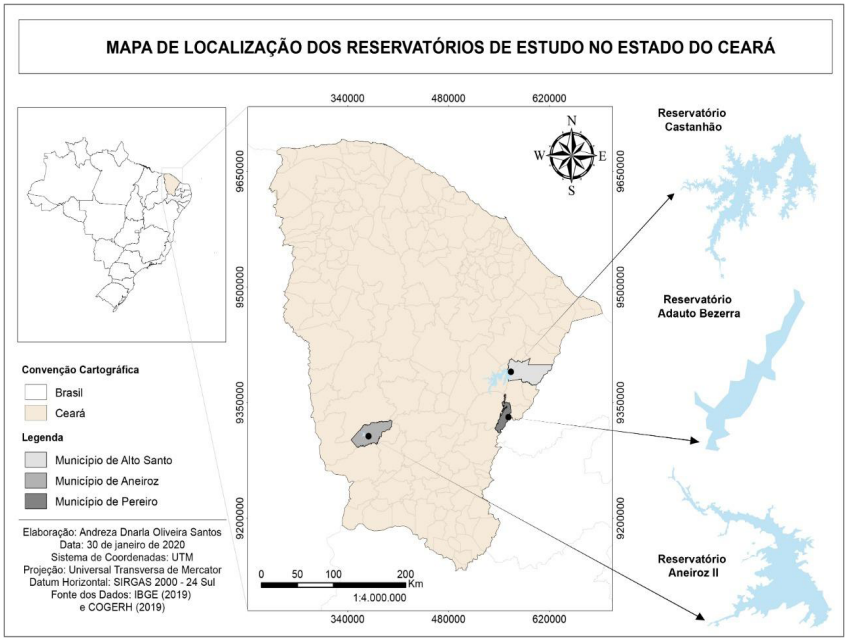

Figura 1 – Localização dos Reservatórios Adauto Bezerra, Arneiroz II e Castanhão.

Foram determinados no monitoramento os parâmetros fósforo total (P), clorofila *a* (Cl*a*) e nitrogênio total (N). A partir desses foram calculados valores de IET segundo Carlson (1977), Cunha, Calijuri e Lampareli (2013) e Pavluk e Bij de Vaate (2017), conforme apresentado na Tabela 1. Posteriormente os reservatórios foram classificados conforme as categorias de estado trófico e nível trófico apresentados na Tabela 2.

As concentrações de fósforo total (*P*) e clorofila *a* são expressas como µg $P.L^{-1}$ e $\mu.L^{-1}$, respectivamente. O nitrogênio total (*N*) é expresso como mg $N.L^{-1}$ em A e em µg $N.L^{-1}$ em C.

Tabela 1 – Modelos aplicados para a construção do IET.

Modelos	Formulação	Referência
A	$IET_P = 14,42.Ln(P) + 4,15$	Carlson (1977), adaptação de Kratzer e Brezonik (1981)
	$IET_{Cla} = 9,81.Ln(Cla) + 30,60$	
	$IET_N = 14,43.Ln(N) + 54,45$	
	$IET_A = (IET_P + IET_{Cla} + IET_N)/3$	
B	$IET_P = 3,987.Ln(P) + 40,815$	Cunha, Calijuri e Lamparelli (2013)
	$IET_{Cla} = 3,624.Ln(Cla) + 47,85$	
	$IET_B = (IET_P + IET_{Cla})/2$	
C	$2,92.Log_{10}(P) + 0,22$	Pavluk e Bij de Vaate (2017)
	$2,54.Log_{10}(Cla) + 2,22$	
	$3,01.Log_{10}(N) - 3,61$	
	$IET_C = (IET_P + IET_{Cla} + IET_N)/3$	

Tabela 2 – Categoria de Estado Trófico e Níveis de tróficos segundo os modelos aplicados.

Classe Trófica		Nível Trófico (NTr)	Intervalos de IET nos modelos		
			A	B	C
Ultra-oligotrófico	(UO)	1	-	≤ 51,1	≤ 2,0
Oligotrófico	(OL)	2	≤ 30	51,2 - 53,1	2,1 - 3,0
Mesotrófico	(ME)	3	31-40	53,2 - 55,7	3,1 - 4,0
Eutrófico	(EU)	4	41-60	55,8 - 58,1	4,1 - 5,0
Supereutrófico	(SE)	5	-	58,2 - 59,0	5,1 - 6,0
Hipereutrófico	(HE)	6	> 60	> 59,0	> 6,0

Foi computado ainda o nutriente limitante no processo de eutrofização nos corpos d'água aplicando as faixas sugeridas por Guildford e Hecky (2000), e apresentadas na Tabela 3, para os três reservatórios (Arneiroz II, Adauto Bezerra e Castanhão), considerando os resultados do monitoramento realizado entre o período de 2012.2 a 2018.1.

Tabela 3 – Nutrientes limitantes segundo as faixas de Guildford e Hecky (2000).

Faixas da relação N/P	Nutriente Limitante
< 20	Nitrogênio (N)
> 50	Fósforo (P)
20 ≤ N/P ≤50	Colimitação de N e P

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Controle da qualidade de água leva em conta os valores máximos permitidos (VMP) dos constituintes presentes. Em relação ao fenômeno da eutrofização, são observados os valores de fósforo total e de nitrogênio total. No Brasil, as condições e padrões que determinam os VMP estão contidas na Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) (Brasil, 2005). A estatística descritiva concernente aos parâmetros de qualidade do estudo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de N, P Cl*a*, e de cianobactérias águas dos reservatórios.

Açude	N (mg..L^{-1} N)	P (mg.L^{-1} P)	Cla (µg/L)	CIAN (Cél.mL^{-1})	Z (m)
Adauto Bezerra	2,36[a] (1,05)[b]	0,085 (0,042)	49 (24)	1,27E+05[d] (3,0E+05)	0,78 (0,26)
	0,80 - 4,40[c]	0,013 - 0,173	17 - 98	7,65E+03 - 9,66E+05	0,48 – 1,40
Arneiroz II	0,75 (0,42)	0,082 (0,074)	6 (4)	2,89E+04 (4,95E+04)	1,40 (0,35)
	0,10 - 1,26	0,014 - 0,243	1 - 15	3,40E+03 - 1,73E+05	0,60 - 1,90
Castanhão	5,38 (3,57)	0,154 (0,149)	112 (79)	3,68E+05 (5,64E+05)	0,32 (0,15)
	1,43 - 11,89	0,014 - 0,538	8 - 254	1,16E+05 - 1,99E+06	0,18 - 0,60

[a] média; [b] desvio padrão; [c] intervalo de variação e [d] média geométrica.

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, para águas doces Classe II em ambientes lênticos, são estabelecidos os VMP de nitrogênio total de 1,27 mg N.L^{-1}, densidade de cianobactérias de até 50000 cel.mL^{-1}, fósforo total de 0,030 mg P.L^{-1} e clorofila *a* de até 30 µg.L^{-1}.

Para a concentração de nitrogênio, apenas o Arneiroz II apresentou valor médio em concordância com o padrão estabelecido. O Castanhão apresentou maior grau de comprometimento, de maneira que todas as amostras apresentaram valores superiores ao limite estabelecido em norma. Comparado aos outros açudes do estudo, as águas do Adauto Bezerra apresentaram grau de comprometimento intermediário. Resultado semelhante foi obtido para o parâmetro clorofila *a*, somente o Arneiroz II apresentou concentração abaixo da fixada na resolução.

Quanto ao fósforo total, todos os reservatórios apresentaram concentração superior ao padrão fixado. Para a densidade de cianobactérias, eram esperados valores elevados, tendo em vista o excesso de nutrientes. Por conversão, as concentrações elevadas de nutrientes, de clorofila *a* e da densidade de cianobactérias implicaram em menores valores de transparência.

3.1 Valores de IET nos reservatórios

A partir das aplicações dos modelos propostos, foi construída uma tabela (Tabela 5) que apresenta a classificação dos reservatórios, apoiado nas médias semestrais, quanto ao estado de trofia seguida da classificação quanto ao nível trófico. Os resultados de classificação foram semelhantes nos três reservatórios, salvaguardadas as características intrínsecas de cada um. De modo geral, houve um decaimento da qualidade das águas represadas representado no aumento nos valores de IET nos últimos cinco anos do estudo, sendo este fenômeno associado à diminuição no volume dos açudes, resultante de estiagem prolongada.

Tabela 5 – Resultados da média semestral par o IET computados com os modelos de Carlson (1977) (*A*), de Cunha, Calijuri e Lamparelli (2013) (*B*) e de Pavluk e Bij de Vaate (2017) (*C*).

Ano e Semestre	Modelo A		Modelo B		Modelo C	
	Classe	Nível trófico	Classe	Nível trófico	Classe	Nível trófico
	Adauto Bezerra					
2012.2	EU	4	ME	3	SE	5
2013.1	HE	6	HE	6	SE	5
2013.2	HE	6	HE	6	HE	6
2014.1	HE	6	HE	6	HE	6
2014.2	HE	6	HE	6	HE	6
2015.1	HE	6	HE	6	HE	6
2015.2	HE	6	HE	6	SE	5
2016.1	HE	6	HE	6	HE	6
2016.2	HE	6	HE	6	HE	6
2017.1	HE	6	HE	6	HE	6
2017.2	HE	6	HE	6	HE	6
2018.1	HE	6	HE	6	HE	6
-	Arneiroz II					
2012.2	EU	4	EU	4	EU	4
2013.1	OL	2	UO	1	OL	2
2013.2	EU	4	EU	4	EU	4
2014.1	HE	6	EU	4	SE	4
2014.2	EU	4	ME	3	EU	4
2015.1	EU	4	ME	3	EU	4
2015.2	HE	6	EU	4	SE	5
2016.1	EU	4	ME	3	EU	4
2016.2	EU	4	ME	3	EU	4
2017.1	EU	4	ME	3	SE	5
2017.2	HE	6	EU	4	SE	5
2018.1	HE	6	EU	4	SE	5
-	Castanhão					
2012.2	EU	4	EU	4	SE	5
2013.1	EU	4	EU	4	EU	4
2013.2	HE	6	HE	6	HE	6
2014.1	HE	6	HE	6	HE	6
2014.2	HE	6	HE	6	HE	6
2015.1	HE	6	HE	6	HE	6
2015.2	HE	6	HE	6	HE	6
2016.1	HE	6	HE	6	HE	6
2016.2	HE	6	HE	6	HE	6
2017.1	HE	6	HE	6	HE	6

Mais especificamente, o Adauto Bezerra foi classificado como hipertrófico pelo modelo *A* proposto por Carlson (1977) e pelo modelo *B* (Cunha; Calijuri; Lamparelli, 2013). A classificação como hipertrófico ocorreu em 91% das campanhas. O modelo *C* de Pavluk e Bij de Vaate (2017) apresentou variações na classificação do estado trófico, sendo a classificação hipertrófica a preponderante, seguida da supertrófica. Em relação ao nível trófico, o açude foi caracterizado predominantemente como hipereutrófico (6) para todos os modelos aplicados no estudo.

A mudança do período seco para o período chuvoso não foi determinante na classificação do estado de trofia no período dos anos de 2016 a 2018. Percebeu-se ainda, que, a partir do primeiro semestre de 2016, o reservatório passou a ser classificado apenas como hipereutrófico pelos três modelos estudados. Assim, as classificações obtidas por meio dos modelos *A, B e C,* embora possuam particularidades, convergem para a classificação do reservatório como hipereutrófico para os últimos dois anos do monitoramento do reservatório.

No reservatório Arneiroz II, o IET do modelo *A* apresentou flutuação tão acentuada quanto no Castanhão. Tal variação também foi seguida quanto a classificação dos níveis tróficos, sendo o Nível 4 (Eutrófico) o de maior representatividade, seguido por hipertrófica (6) e oligotrófica (2).

Para o modelo *B*, as classificações predominantes foram a Eutrófica e a Mesotrófica. Tem-se na literatura que, em períodos não chuvosos, correspondente ao segundo semestre, espera-se um acréscimo na concentração de nutrientes em função das altas taxas de evaporação, de modo que esse cenário configura não só uma tendência de concentração de nutrientes na água como também um maior crescimento da biomassa algal (Braga *et al.*, 2015), o que tende a aumentar os valores de IET. Tal comportamento, de aumento do grau de trofia no período de estiagem, foi observado nos anos de 2013, 2015 e 2017.

O modelo *C* apresentou a maior sensibilidade quanto à classificação do estado trófico para o Arneiroz II. Observou-se ainda, que, do segundo semestre do ano de 2016 até o primeiro semestre do ano de 2018, houve um aumento da trofia no reservatório. Fato também apontado para o reservatório Adauto Bezerra.

Os três modelos aplicados no estudo classificaram o Castanhão como predominantemente hipertrófico, representando 80% das campanhas. Assim como o IET, o nível de trofia também classificou o Castanhão como predominantemente hipertrófico, a partir de 2013.2, para todos os modelos aplicados na pesquisa.

Observou-se que, assim como nos outros dois reservatórios objetos do estudo, houve um aumento na atividade primária a partir do segundo semestre de 2013, implicando no aumento do estado trófico e indicando um decaimento da qualidade da água.

Notou-se de modo geral que o modelo *A,* proposto por Carlson (1977), apresentou classificações mais rígidas, classificando os reservatórios predominantemente como hipertróficos. Cabe lembrar que este modelo foi proposto para ambientes aquáticos de zona temperada, implicando em limitações quando aplicados em zonas tropicais. Ainda segundo Pavluk e Bij de Vaate (2017), deve-se levar em consideração que o IET Carlson foi desenvolvido para uso em lagos com poucas plantas aquáticas enraizadas e pouca turbidez não algal.

Essa situação também foi relatada por Araújo, Mendonça e Reis (2018), que avaliando a aplicação dos modelos Carlson (1977), Lamparelli (2004) e Cunha, Calijuri e Lamparelli (2013) aos reservatórios da Hidroelétrica de Rio Bonito e da Usina Hidroelétrica Suíça, observaram maior rigidez no modelo proposto por Carlson (1977). Segundos

os autores, os modelos de Lamparelli (2004) e Cunha, Calijuri e Lamparelli (2013), desenvolvidos para reservatórios de clima tropical/subtropical, apresentaram resultados mais próximos.

3.2 Correlação entre modelos de IET

Na Figura 2 são mostradas as correlações entre os modelos aplicados na pesquisa. Foram geradas duas equações de regressão entre eles, e através dessas equações é possível expressar os valores de IET.

Os resultados demonstram elevada correlação entre os modelos IET_A e IET_B em relação ao IET_C, com coeficientes de determinação de $R^2 = 0,998$ e $R^2 = 0,962$, respectivamente, validando os modelos aqui propostos. O modelo IET_A destacou-se por sua maior sensibilidade e capacidade de ajuste ao modelo do IET_C, evidenciando a precisão na identificação e quantificação das variações do estado trófico de ambientes aquáticos de clima temperado desses modelos.

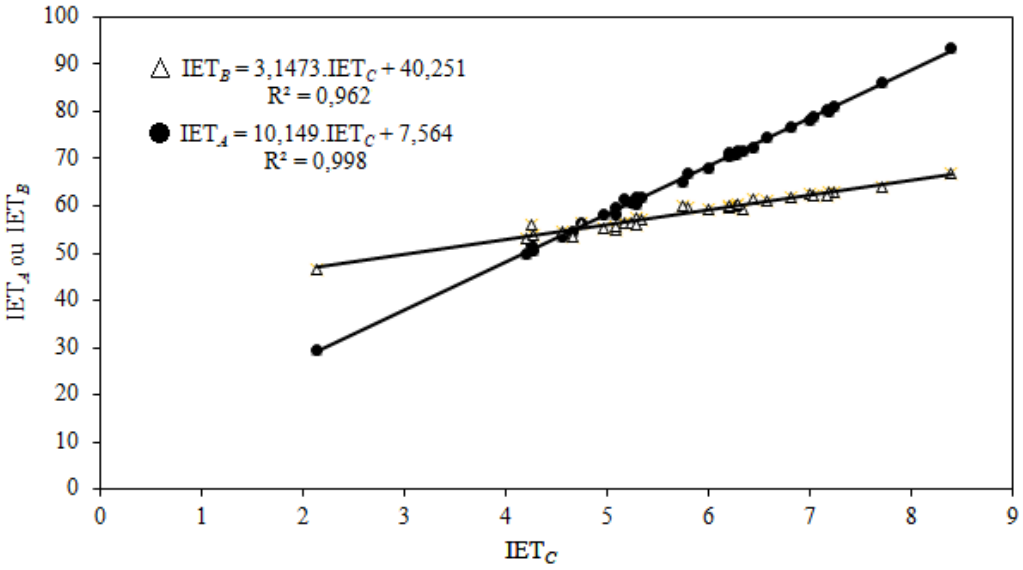

Figura 2 – Equações de regressão linear entre os modelos de cômputo de IET.

3.3 Nutriente limitante

A razão N/P, para identificar o nutriente limitante, está contida na Tabela 6. Nos três reservatórios em estudo, o fósforo predominou como nutriente limitante. No reservatório Arneiroz II, entretanto, verificou-se uma proximidade entre os estados de limitação por nitrogênio (41,7%) e por fósforo (50%).

A maioria dos estudos realizados em latitudes tropicais obteve respostas mais fortes à adição do fósforo que em relação à adição do nitrogênio, sugerindo que os ecossistemas tropicais são predominantemente limitados por fósforo, convergindo com os valores aqui apresentados (Elser *et al.*, 2007).

Embora a compreensão conceitual de limitação de nutrientes seja baseada essencialmente em um único nutriente, conforme proposto na Lei do Mínimo de Liebig, a aplicação da faixa sugerida por Guildford e Hecky (2000) possibilita identificar a colimitação dos nutrientes, que pode ser bem mais frequente que a limitação por um único nutriente (Elser *et al.*, 2007). Nesse contexto Harpole *et al.* (2011), ao avaliarem a colimitação de nutrientes de produtores primários, observaram que esse tipo de limitação foi predominante em conjunto de

dados analisados. No presente estudo, entretanto, a colimitação não representou o padrão mais frequente, indicando interações sinérgicas quanto ao enriquecimento por nitrogênio e fósforo.

Um aspecto a ser considerado é a existência de cianobactérias com habilidade de fixar o nitrogênio atmosférico de modo que essas espécies são capazes de superar a limitação de nitrogênio via fixação. Desse modo, mesmo que se tenha um controle sobre o aporte externo do nitrogênio, a concentração desses organismos não reduziria com a diminuição da carga afluente do nitrogênio (Cunha *et al.*, 2013; von Sperling, 2005). Assim, segundo Silas e Martino (1991), a maior parte dos lagos tropicais da América Latina possuem o fósforo como limitante, assim como os resultados aqui apresentados.

Diante disso, a definição do nutriente limitante é uma ferramenta importante para o estabelecimento de planos de manejo em bacias hidrográficas quando se pretende reduzir o grau de trofia destas.

Tabela 6 – Variação da razão N/P (base molar) ao longo do estudo nos reservatórios Adauto Bezerra, Arneiroz e Castanhão.

Ano/Semestre	Adauto Bezerra	Arneiroz II	Castanhão
2012.2	311	7	235
2013.1	12	16	226
2013.2	78	2	25
2014.1	68	9	71
2014.2	193	67	109
2015.1	48	35	106
2015.2	25	15	97
2016.1	86	47	121
2016.2	85	70	117
2017.1	66	47	49
2017.2	34	51	-
2018.1	66	53	-
Média	**89**	**35**	**116**
CV	0,934	0,693	0,588
N limitante	8,3%	41,7%	0,0%
P limitante	75,0%	50,0%	90,0%
Colimitação	16,7%	8,3%	10,0%

3.4 Uso e ocupação do solo e aspectos ambientais

Alguns fatores, além da estiagem prolongada, podem ter colaborado para os valores de IET encontrados na presente pesquisa. Os valores apresentados podem ser resultado tanto da entrada de nutrientes provenientes de processos naturais, bem como das atividades humanas ocorridas no entorno dos reservatórios, aumento da população, falta de estrutura de saneamento básico, mudanças climáticas e mudanças rápidas no uso e ocupação do solo (Cunha *et al.*, 2011).

Rolim *et al.* (2019) estudaram um conjunto de 18 reservatórios da bacia do Banabuiú, na porção central do Ceará, e observaram, através dos parâmetros clorofila *a* e fósforo total, que os reservatórios apresentam características que indicam a eutrofização, e que este fenômeno possivelmente está relacionado ao uso e ocupação ao redor dos reservatórios.

As altas concentrações de fósforo, conforme o verificado nos reservatórios aqui estudados, podem estar fortemente relacionadas com o uso e ocupação do solo e ao nível de ocupação urbana (Leal, 2006). Observa-se que as águas dos reservatórios estudados contêm diversos tipos de usos, sendo comum aos três a dessedentação animal, usos públicos (empresas concessionárias), usos domésticos locais e irrigação (COGERH, 2015). O desenvolvimento dessas atividades fundamenta os resultados aqui encontrados, onde todos os reservatórios apresentaram concentrações de fósforo total acima do VMP fixado na Resolução CONAMA nº 357/2005, especialmente o Castanhão.

Quanto ao Castanhão, cabe uma prospecção do desenvolvimento de atividades no entorno e dentro do próprio açude. O Inventário Ambiental do Açude (IVA) realizado em 2011 identificou oito atividades com potencial poluidor associadas ao reservatório, dentre elas a aquicultura. No Castanhão, essa atividade é realizada por piscicultores autônomos e por empreendimentos privados. A aquicultura intensiva contribui para a introdução de matéria orgânica no reservatório, principalmente devido ao excesso de ração não consumida. Além disso, práticas como evisceração, descamação e lavagem do pescado, realizadas nas margens do açude, intensificam o aporte orgânico e favorecem a elevação do estado trófico do ambiente (SOUZA *et al.*, 2017)de modo a se dispor de água em quantidade e qualidade adequadas à saúde, aos meios de subsistência, aos ecossistemas e à produção. No que se refere à gestão da quantidade de água, houve muitos avanços desde a aprovação da Política Nacional de Recursos Hídricos em 1997. As competências e atribuições de cada ente do sistema estão definidas na legislação pertinente. No que se refere à gestão da qualidade de água, no entanto, há um grande número de normativos aplicáveis e de instituições competentes para atuarem na fiscalização e na regulação da matéria. Em função dessa gama de informações, configura-se a necessidade de sistematização e síntese do arcabouço legal/institucional. Para essa finalidade, este trabalho propõe associar a metodologia da matriz de sistematização institucional aos instrumentos de monitoramento ambiental já praticados no Ceará. Espera-se que essa associação propicie visualizar as fontes potencialmente poluidoras, os normativos pertinentes e as instituições competentes. A metodologia foi aplicada ao reservatório Castanhão, no estado do Ceará. Identificou-se que 50% das fontes poluidoras são geradas por entidades públicas (Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE; Serviço Autônomo de Água e Esgoto - SAAE; ou prefeituras municipais.

O projeto de piscicultura é uma ação do Governo Federal, financiado com recursos do DNOCS, com o objetivo de produzir renda para os moradores Jaguaribarenses, a prática consiste em uma piscicultura intensiva, desenvolvida em tanques-rede (Cabral, 2016), que pode contribuir com o aumento da concentração de fósforo no meio.

Os principais aspectos ambientais identificados nos reservatórios da bacia do médio Jaguaribe (Adauto Bezerra e Castanhão) estão relacionados ao aporte de esgoto doméstico da comunidade do entorno, lavagem de roupa e de carros, uso de agrotóxicos e de fertilizantes, animais soltos e a utilização do reservatório como balneário. Os aspectos relacionados ao reservatório Arneiroz II (Alto Jaguaribe) são uso de agrotóxico, aterro sanitário e confinamento de animais a montante, e de uso de fertilizantes e animais soltos no entorno do reservatório (COGERH, 2015).

As informações de como se dá o uso e a ocupação do solo junto à identificação dos aspectos ambientais dos reservatórios formam um conjunto de elementos relevante para a compreensão dos processos de integração que ocorrem entre os diversos usos das bacias hidrográficas e a consequente conservação ou deterioração da qualidade da água dos reservatórios (Rolim *et al.,* 2019).

3.5 A redução do volume disponível nos reservatórios e a qualidade da água

A partir da Figura 3, observa-se a variação do volume dos reservatórios ao longo do período de estudo. No semiárido os longos períodos de estiagem associados à captação de água são os fatores que mais contribuem para a diminuição do nível de água nos reservatórios, uma vez que a perda de água é superior ao ganho (Costa; Attayde; Becker, 2016). Ainda segundo Rocha *et al.(*2018), as altas taxas de evaporação associadas à falta de precipitação (estiagem) também influenciam na diminuição do volume. Tais fatores possivelmente explicam o ocorrido no presente estudo, sendo este cenário evidenciado nos reservatórios Adauto Bezerra e Castanhão.

Segundo Braga *et al.* (2015), em reservatórios submetidos a prolongados períodos de estiagem, a redução do volume hídrico favorece o crescimento de algas, em função do aumento na disponibilidade de nutrientes, acarretando a degradação da qualidade da água. Ainda em condições semiáridas, a baixa taxa de renovação da massa de água armazenada intensifica o processo de eutrofização (Rolim *et al.,* 2019).

A partir da Figura 3, percebe-se, de modo geral, que o volume disponível nos reservatórios possui uma correlação negativa com o crescimento das cianobactérias, visto que, à medida que o volume diminui, ocorre um aumento na população desses organismos. O aumento da frequência e intensidade de florações de cianobactérias tem sido reconhecido como principal problema ligado a eutrofização e qualidade da água (Vidal; Capelo Neto, 2014).

No reservatório Adauto Bezerra, a concentração de cianobactérias manteve-se acima do limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005, do período de 2014.1 até o início de 2018.1, quando retorna aos VMP. O reservatório Arneiroz II manteve-se por mais tempo dentro dos VMP, excetuando-se o período de 2015.1 a 2016.2. No Castanhão, por sua vez, a concentração de cianobactérias manteve-se durante todo o período do estudo acima do parâmetro estabelecido de 50000 cel/mL.

Observa-se também que o Castanhão e o Adauto Bezerra já haviam apresentado concentrações de cianobactérias acima do preconizado pela referida resolução antes mesmo do decaimento do volume disponível de água, indicando que outros fatores podem ter favorecido a floração desses organismos.

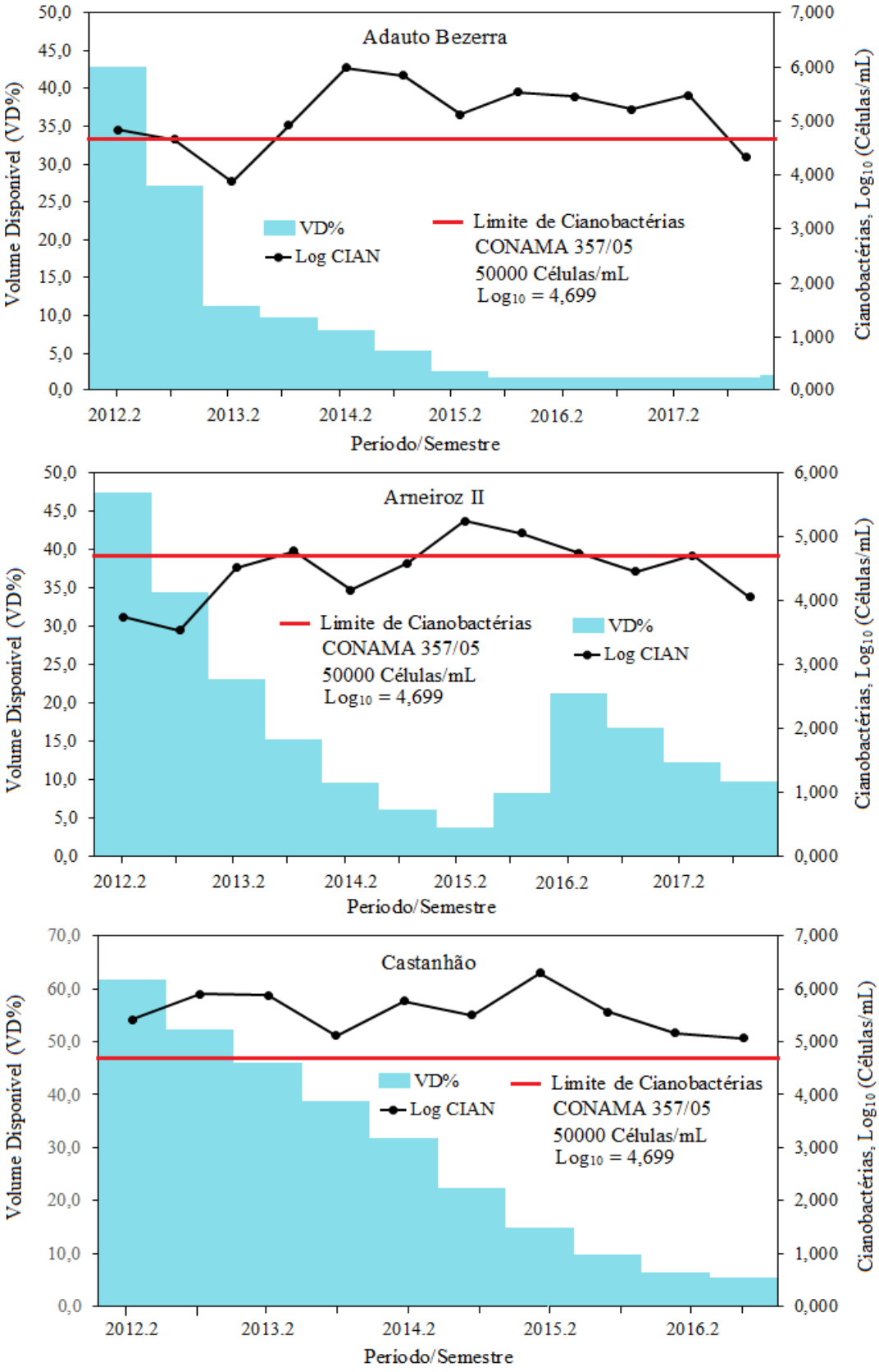

Figura 3 – Variação do volume disponível e a densidade de cianobactérias.

Além das condições ambientais, outros fatores colaboram com predominância de cianobactérias em ambientes eutrofizados, como a tolerância às temperaturas acima de 25°C, baixo requerimento de luz, capacidade de armazenamento de fósforo e fixação do nitrogênio atmosférico, capacidade de flutuação, altas concentrações de fósforo e baixa taxas de nitrogênio/fósforo, entre outros (Chorus; Bartram, 1999; Dokulil; Teubner, 2000; Havens *et al*., 2003).

Os períodos de estiagem associados à redução do volume disponível de água em reservatórios tendem a aumentar a eutrofização e a degradação da água (Brasil *et al*., 2016). O presente estudo colabora com essa afirmativa, uma vez que a redução do volume disponível nos reservatórios foi acompanhada do aumento da concentração de nitrogênio, fósforo, clorofila *a* e da diminuição da transparência da água(Z), observa-se ainda que todos os três reservatórios apresentaram um aumento da atividade trófica, sendo classificados prioritariamente como hipertrófico para os modelos aplicados.

4 CONCLUSÕES

Os resultados dos IETs nas águas dos reservatórios Adauto Bezerra, Arneiroz II e Castanhão indicaram a perda de qualidade da água ao longo do tempo do monitoramento, resultando na classificação hipertrófica como predominantemente para os três modelos aplicados.

O fósforo foi identificado como nutriente limitante para os reservatórios Adauto Bezerra e Castanhão, enquanto o Arneiroz II indicou tanto fósforo como o nitrogênio como limitante, sugerindo colimitação.

A partir dos valores de IET, evidenciou-se que os longos períodos de estiagem estão associados ao aumento da concentração de nutrientes, clorofila *a* e diminuição da transparência da água (Z), resultando na diminuição da qualidade da água reservada. Sendo essa qualidade também afetada pela forma de uso e ocupação do solo.

O presente estudo evidencia a necessidade de intervenções na gestão de reservatórios, visando mitigar os processos de degradação da qualidade da água. Nesse sentido, a utilização dos Índices de Estado Trófico (IET) configura-se como uma ferramenta metodológica simples e eficiente simples para a avaliação e o monitoramento da qualidade dos recursos hídricos. Dessa forma, o IET pode ser incorporado como instrumento estratégico na formulação de políticas de controle da poluição, contribuindo para a promoção da sustentabilidade hídrica. Sua aplicação em reservatórios sujeitos a pressões ambientais semelhantes revela-se promissora, oferecendo subsídios para a gestão e a conservação dos recursos hídricos.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro concedido por meio de bolsas de estudo.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Santos ADO, Costa THS; **Metodologia**: Silva FJA; **Investigação:** Santos ADO, Silva FJA; **Redação – Revisão & Edição:** Santos ADO, Silva FJA, Nunes ABA; **Supervisão:** Silva FJA.

7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Indicadores Estado Trófico**. Brasília, DF: ANA, 2019. Disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx. Acesso em: 15 nov. 2019.

ARAÚJO, D. R.; MENDONÇA, A. S. F.; REIS, J. A. T. dos. Análise de variação e comparação de índices de estado trófico: reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos de Rio Bonito e Suíça. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 55-62, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413415220180001000 55&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 11 nov. 2019.

ARAÚJO, J. A.; SALES, R. J. M.; SOUZA, R. O. de. Riscos de eutrofização em reservatórios de regiões semiáridas com uso da teoria dos conjuntos difusos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 29-39, jan./jun. 2013.

BRAGA, G. G. *et al*. Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 27, n. 1, p. 15-23, 2015. DOI: https://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2214.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459. Acesso em: 20 nov. 2019.

BRASIL, J. *et al.* Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. **Hydrobiologia**, [*s. l.*], v. 770, n. 1, p. 145-164, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s10750-015-2578-5.

CABRAL, R. M. **A influência do Açude Castanhão na dinâmica do uso e ocupação do município de Jaguaribara (2000-2014)**. 2016. 120 f. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/29071. Acesso em: 26 set. 2025.

CARLSON, R. E. A. Trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, [*s. l.*], v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

CHORUS, I.; BARTRAM, J. (eds.). **Toxic Cyanobacteria in Water**: A Guide to their public health consequences, monitoring and management. London: E&FN Spon, 1999.

COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS – COGERH. **Inventários Ambientais**. Fortaleza: COGERH, 2015. Disponível em: http://www.hidro.ce.gov.br/mi/midia/show/149. Acesso em: 7 out. 2019.

COSTA, L. R. F. da; DANTAS, S. P. Clima e a problemática das secas no Ceará: um novo olhar sobre os grandes reservatórios e o avanço da desertificação. **Revista Geonorte**, [*s. l.*], v. 2, n. 5, p. 1034-1042, 2012.

COSTA, M. R. A.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes. **Hydrobiologia**, [*s. l.*], v. 778, n. 1, p. 75-89, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s10750-015-2593-6. Acesso em: 7 out. 2019.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C.; LAMPARELLI, M. C. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). **Ecological Engineering**, [*s. l.*], v. 60, p. 126-134, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058.

CUNHA, D. G. F. *et al.* Trophic state evolution in a subtropical reservoir over 34 years in response to different management procedures. **Water science and technology**, [*s. l.*], v. 64, p. 2338-2344, 2011.

DOKULIL, M. T.; TEUBNER, K. Cyanobacterial dominance in lakes. **Hydrobiologia**, [*s. l.*], v. 438, p. 1-12, 2000.

ELSER, J. J. *et al.* Análise global da limitação de nitrogênio e fósforo de produtores primários em ecossistemas de água doce, marinha e terrestre. **Ecology Letters**, [*s. l.*], v. 10, n. 12, p. 1135-1142, 2007.

GUILDFORD, S. J.; HECKY, R. E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? **Limnology and Oceanography**, [*s. l.*], v. 45, n. 6, p. 1213-1223, 2000.

HARPOLE, W. S. *et al*. Co-limitação de nutrientes das comunidades produtoras primárias. **Ecology Letters**, [*s. l.*], v. 14, n. 9, p. 852-862, 2011. DOI: http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01651.x.

HAVENS, K. E. et al. N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. **Environmental Pollution**, [*s. l.*], v. 122, n. 3, p. 379-390, 2003. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00304-4.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo**: avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LEAL, P. R. **Avaliação de indicadores do estado trófico de uma lagoa costeira**: Lagoa de Jacuném. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

MAIA, A. A. D.; CARVALHO, S. L.; CARVALHO, F. T. de. Comparação de dois índices de determinação do grau de trofia nas águas do Baixo Rio São José dos Dourados, São Paulo, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 613-622, 2015. DOI: https://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020040121258.

MALTA, J. F. *et al.* Exposure to microcystin-LR in tropical reservoirs for water supply poses high risks for children and adults. **Environmental Monitoring and Assessment**, [*s. l.*], v. 194, n. 4, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/s10661-022-09875-z. Acesso em: 27 set. 2025.

PAVLUK, T.; BIJ DE VAATE, A. Trophic index and efficiency. *In*: SCIENCE DIRECT. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 495-502. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.00608-4.

PEREIRA NETO, M. C. Perspectivas da açudagem no semiárido brasileiro e suas implicações na região do Seridó Potiguar. **Sociedade & Natureza**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 285-294, 2017.

ROLIM, H. O. *et al.* Proposal of a trophic state index in semiarid reservoirs using data of the Banabuiú Basin, state of Ceará, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Paulo, v. 31, e26, 2019. DOI: https://dx.doi.org/10.1590/s2179-975x12517.

SILAS, H. J.; MARTINO, P. A simplified phosphorus trophic state model for warmwater tropical lakes. **Water Research**, [*s. l.*], v. 25, n. 3, p. 341-350, 1991.

SOUZA, E. G. de *et al.* Segurança hídrica do reservatório Castanhão-CE: aplicação da matriz de sistematização institucional. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 877-887, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522017000500877&tlng=pt. Acesso em: 12 out. 2019

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE – SUDENE. **Resolução Nº 115, de 23 de novembro de 2017**. Aprova a Proposição nº 113/2017, que acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL nº 107, e 27 de julho de 2017. Recife: SUDENE, 2017.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; ABE, D. S. The ecological dynamics of Barra Bonita (Tietê River, SP, Brazil) reservoir: implications for its biodiversity. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 68, n. 4, p. 1079-1098, 2008. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842008000500015.

VIDAL, T. F.; CAPELO NETO, J. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4, p. 402-407, 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000400007.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA, Ed. UFMG, 2005. v. 1.