

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## RAZÃO N/P, CIANOBACTÉRIAS E ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO EM TRÊS RESERVATÓRIOS SOB ESTIAGEM PROLONGADA NO NORDESTE

Reinaldo Fontes Cavalcante<sup>1</sup>  
\* Maria Patrícia Sales Castro<sup>2</sup>  
Mateus de Alencar Costa<sup>2</sup>  
Fernando José Araújo da Silva<sup>2</sup>

### N/P RATIO, CYANOBACTERIA AND TROPHIC STATE INDEX AT THREE RESERVOIRS UNDER A PROLONGED DROUGHT IN BRAZIL'S NORTHEAST

Recibido el 16 de septiembre de 2018; Aceptado el 28 de agosto de 2019

#### Abstract

The degree of eutrophication was analyzed in three reservoirs at the Brazilian semi-arid tropic, in Ceará State. The study covered a period of one decade and the water sampling was quarterly. The analysis took into account total nitrogen (N), total phosphorus (P), chlorophyll a (Cla) and total cyanobacteria numbers (CB). These quality parameters were complemented with rainfall data (Pp) and percentage of available water volume in the reservoirs (AV%). The percentages of compliance of the Cla concentrations with the environmental standard (CONAMA 357/05) were 60, 6 and 100% in the Banabuiú, Cipoada and Capitão Mor reservoirs, respectively. For total phosphorus, the percentages were 10, 63 and 12%, respectively. For the total count of cyanobacteria, the compliance results were 23, 6 and 86%. The results showed that the degree of eutrophication in Cipoada was higher than in Banabuiú, followed by Captain Mor. The environmental standard does not directly address total nitrogen, but this nutrient correlated positively with P and Cla. Concentrations of total nitrogen may have an equivalent impact to phosphorus. In the study,  $N: P > 38$  ratios predominated in Cipoada and Banabuiú. In Captain Mor the range from 22 to 38 was predominant for the  $N: P$  ratio. The TSI values were high, indicating hypertrophy in the Cipoada and Banabuiú, and eutrophic in Captain Mor. Reduction of AV% contributes to the process of eutrophication, with increased nutrients and cyanobacteria counts.

**Keywords:** semi-arid tropic, eutrophication, climate change.

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação e Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus do Quixadá, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Ceará, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, Ceará, Brasil.

\* Autor correspondente: Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza, Ceará, Brasil. Email: [patricia.sales@gmail.com](mailto:patricia.sales@gmail.com)

## Resumo

O nível de eutrofização em três reservatórios do trópico semiárido brasileiro, no Ceará, foi analisado para um período de uma década, através de intervalos trimestrais. A análise foi baseada em relação às concentrações de nitrogênio total (N), fósforo total (P), clorofila a (Cl<sub>a</sub>) e contagem total de cianobactérias (CB). Esses parâmetros de qualidade foram complementados com dados de pluviometria (Pp) e percentual de volume de água disponível nos reservatórios (VD%). Os percentuais de conformidade das concentrações de Cl<sub>a</sub>, com a norma ambiental (CONAMA 357/05) foram de 60, 6 e 100%, no Banabuiú, Cipoada e Capitão Mor, respectivamente. Para o fósforo total os percentuais foram de 10, 63 e 12%, respectivamente. Para a contagem total de cianobactérias os percentuais de conformidade foram de 23, 6 e 86%. Os resultados mostraram que o grau de eutrofização no Cipoada foi mais elevado que no Banabuiú, seguido do Capitão Mor. A norma ambiental não aborda diretamente o nitrogênio total, mas esse nutriente correlacionou positivamente com P e Cl<sub>a</sub>. As concentrações de nitrogênio total podem ter impacto equivalente às de fósforo. No estudo, predominaram razões N:P > 38 no Cipoada e no Banabuiú. No Capitão Mor predominou o intervalo de 22 a 38 para a razão N:P. Os valores de IET foram elevados, indicando hipertrofia no Cipoada e no Banabuiú, e eutrofia no Capitão Mor. O abatimento de VD% colabora o processo de eutrofização, com incremento de nutrientes e de contagem de cianobactérias.

**Palavras chave:** trópico semiárido, eutrofização, mudança climática.

## Introdução

A eutrofização de corpos aquáticos resulta do excesso de nutrientes disponíveis para incremento da produtividade primária. Para melhor compreensão e controle do processo de eutrofização importa identificar qual nutriente é responsável pelo incremento da produção primária. Assim, a razão entre nitrogênio total e fósforo total da água (N:P) tem sido longamente utilizada para tal fim (Smith *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2017). Por outro lado, a interpretação dos resultados deve ser feita com cautela, pois a relação N:P pode não ser suficiente para indicar o nutriente limitante do sistema aquático.

A interpretação das razões molares de N:P costuma ser balizada em três intervalos: menores que 22, maiores que 38 e de 22 a 38. No primeiro o nitrogênio é considerado limitante e, no segundo, o fósforo é considerado o nutriente limitante. No terceiro, tanto N como P pode ser limitante. Apesar disso, os limiares da razão N:P têm variações na literatura e dependem de aspectos distintos como espécies fitoplanctônicas dominantes, formas inorgânicas de nutrientes, hidrologia e clima (Barica, 1990; Downing; Mccauley, 1992; Smith *et al.*, 1995; Havens *et al.*, 2003; Klausmeier *et al.*, 2004; Markou; Vandamme; Muylaert, 2014). A razão N:P subsidia ainda a análise da ocorrência de cianobactérias, organismos procarióticos, porém agrupados junto a eucariotas fotossintetizadores.

As cianobactérias são capazes de se adaptarem a ambientes diversificados (Rasmussen *et al.*, 2008; Catherine *et al.*, 2013). Apesar de apontar desequilíbrio no ambiente aquático (Paerl; Otten, 2013; Huisman *et al.*, 2006), o significado sanitário das cianobactérias é mais destacado, pois estes organismos causam odor e sabor nas águas de abastecimento. A consequência mais danosa,

porém, é a relação com metabólitos tóxicos (ciano toxinas), que podem ser excretados ou resultar de ruptura celular (Lopez *et al.*, 2008; Merel *et al.*, 2013; Backer *et al.*, 2015; Pearson *et al.*, 2016). Os organismos fitoplanctônicos produtores de toxinas são quase que exclusivamente cianobactérias (Bukowska *et al.*, 2017). As toxinas mais encontradas são as microcistinas, saxotonixas e cilindroperoxinas. Todas são potencialmente oncogênicas e não são eliminadas com tratamento de água convencional (Sulis, 2014; He *et al.*, 2016). O monitoramento desses produtores primários no ambiente tem se tornado desafio dos sistemas de controle da qualidade da água.

A biodisponibilidade de nutrientes combinada à mudança climática favorece à eutrofização e às florações de cianobactérias (Paerl; Huisman, 2008, 2009; Wagner; Adrian, 2009; Paerl; Paul, 2012; Dokulil, 2016; Sepulveda-Jauregui *et al.*, 2018). Em tal conjunção, o Índice de Estado Trófico (IET) deve refletir a produtividade primária intensa. O índice de Carlson (1977) é o mais utilizado e considera a transparência da água, concentrações de fósforo total e de clorofila a. Há variações, como as vistas em Toledo Jr. *et al.* (1983), Paulic, Hand e Lord (1996), Lamparelli (2004), Cunha *et al.* (2013a) e Wen *et al.* (2016). Em seu estudo original o IET destaca três classes de trofia: Oligo, Meso e Eutrófico. Os demais estudos acrescentam outras classes e intervalos com discussões de suas peculiaridades, porém mantém a fundamentação de Carlson.

A conjunção mudança climática e eutrofização constitui desafio singular no geossistema semiárido brasileiro. O clima nessa região é caracterizado como tropical quente semiárido, com duas estações bem distintas: uma seca, quando chove muito pouco, e, uma úmida, quando ocorrem precipitações irregulares e diferenciadas (Barbosa *et al.*, 2012; Alvalá *et al.*, 2017). Outras características do clima na região são: médias térmicas elevadas (de 25 a 29°C), índice de aridez de Thorntwaite entre 0.20 a 0.50, risco de ocorrência de seca igual ou superior a 60%, percentual diário de déficit hídrico superior a 60% e limite superior de isoieta de precipitação de 800 mm/ano (Brasil, 2005; 2006).

O estado do Ceará é uma das unidades federativas componentes do semiárido brasileiro, cujo clima tropical quente semiárido ocorre em 98 municípios, com uma extensão de 101.001 km<sup>2</sup> (cerca de 68% da área total). Enquanto vicissitude climática, sua área de influência alcança até 150 municípios (87% do território cearense) inseridos no semiárido (Ribeiro; Silva, 2010).

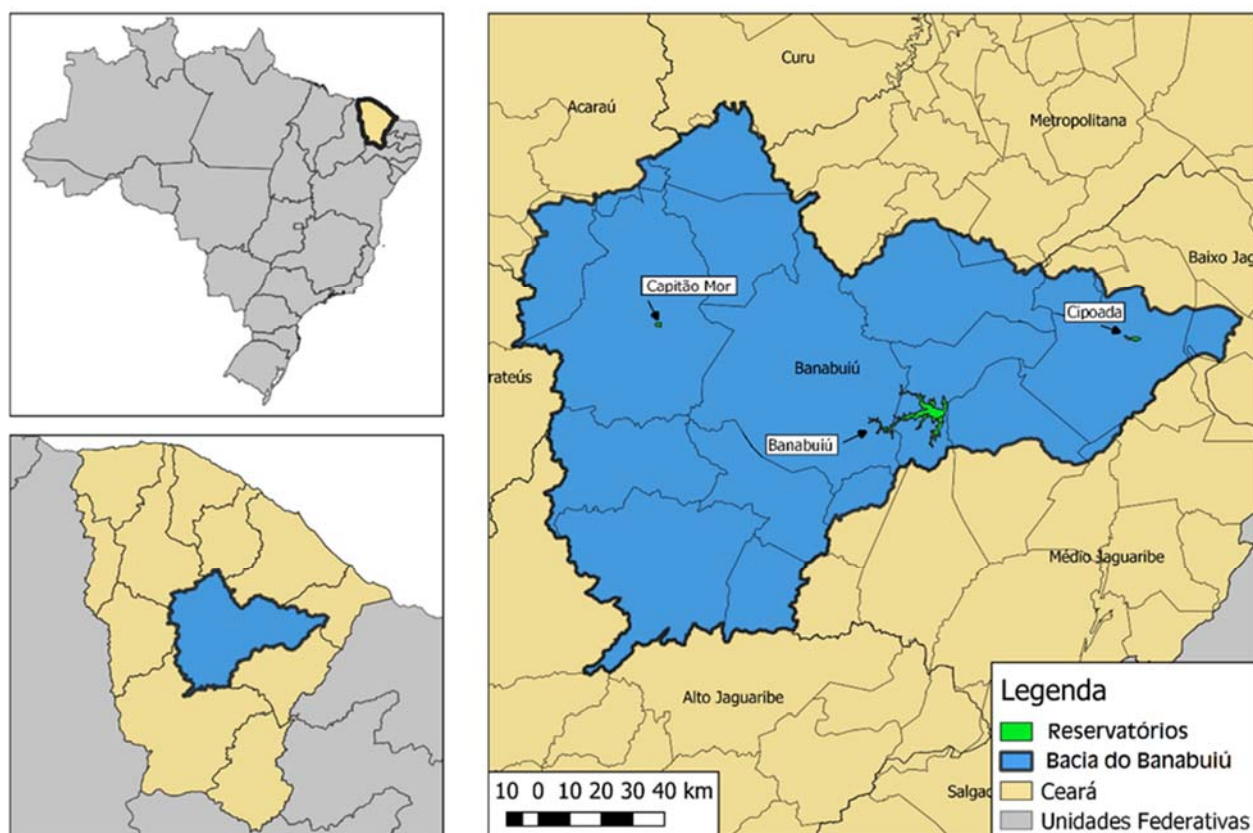
O contorno climático acima mencionado torna a região bastante vulnerável quanto à disponibilidade de água. A construção de barragens tem sido a alternativa mais empregada para garantir o suprimento hídrico em períodos de estiagem (Gunkel *et al.*, 2015). Em paralelo, a variação inerente do clima também impacta a qualidade das águas reservadas. A ocorrência de déficit hídrico por longos períodos favorece à concentração de nutrientes, que tende a acelerar a produtividade primária.

O presente estudo contempla o fenômeno da eutrofização em três reservatórios cearenses. Aborda-se na investigação a relação de causa e efeito entre a estiagem prolongada e indicadores de elevação da produtividade primária, com destaque para as concentrações totais de nitrogênio e fósforo, a razão N:P, a densidade de cianobactérias e o IET.

## Metodologia

### Reservatório do estudo

O Estado do Ceará conta com 12 bacias hidrográficas. Para o presente estudo foram considerados os seguintes reservatórios: Banabuiú, Capitão Mor e Cipoada (Figura 1). Os açudes estão localizados em pontos estratégicos da bacia do Banabuiú e estão sob os seguintes usos: abastecimento humano, dessedentação de animais e irrigação. A Tabela 1 sumariza as informações técnicas elementares sobre os reservatórios.



**Figura 1.** Localização da Bacia do Banabuiú no Ceará e dos reservatórios estudados.

Fonte: SRH (2018a)

**Tabela 1.** Características dos reservatórios do estudo

Característica	Banabuiú	Capitão Mor	Cipoada
Município	Banabuiú	Pedra Branca	Morada Nova
Coordenadas geográficas	5°21'46"S - 8°59'39"W	5°37'17"S - 40°0'35"W	5°37'17"S - 40°0'35"W
Capacidade (hm <sup>3</sup> )	1601.00	6.00	86.09
Área da bacia hidrográfica (Km <sup>2</sup> )	14249.5	112.6	351.9
Vazão regularizada (m <sup>3</sup> /s)	11.61	0.40	0.23
Ano de conclusão	1966	1988	1922

Fonte: SRH (2018a).

### Dados do estudo

Os dados utilizados no estudo foram obtidos junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), com campanhas de fevereiro de 2008 a maio de 2018. Foram coletadas amostras a 30 cm de profundidade da superfície da coluna líquida, no horário da manhã (entre 9:00 e 10:00h) em ponto próximo ao barramento de cada reservatório.

As coletas tiveram frequência trimestral e foram determinados os seguintes parâmetros: temperatura (T), transparência (Z), fósforo total (P), nitrogênio total (N), clorofila a (Cl<sub>a</sub>) e contagem total de cianobactérias (CB). As técnicas utilizadas para a coleta e determinação das amostras foram realizadas conforme descrito em APHA (2005).

Além dos dados acima, a pesquisa contou ainda, para o mesmo período, com informações sobre o volume disponível (VD%) nos reservatórios no momento da coleta e sobre a precipitação (Pp) de base mensal em estações pluviométricas, com dados consistidos, próximas a cada reservatório. Esses dados foram obtidos no Portal Hidrológico da SRH (2018b).

### O cálculo do Índice do Estado Trófico

Os subíndices do IET (para Z, P e Cl<sub>a</sub>) foram computados conforme Carlson (1977). O conjunto foi ampliado com o subíndice relativo ao nitrogênio, de acordo com Kratzer e Brezonik (1981). As equações empregadas foram as de números 1 a 4 e as classes de trofia foram definidas a partir do índice final (média dos subíndices) conforme a Tabela 2:

**Tabela 2.** Classificação do Índice do Estado Trófico (IET)

IET	
Oligotrófico	≤30
Mesotrófico	31 - 40
Eutrófico	41 - 60
Hipereutrófico	> 60



$$IET_Z = -14.4 \ln(Z) + 60$$

Equação (1)

$$IET_P = 14.42 \ln(P) + 4.15$$

Equação (2)

$$IET_{Cla} = 9.81 \ln(Cla) + 30.60$$

Equação (3)

$$IET_N = 14.43 \ln(N) + 54.45$$

Equação (4)

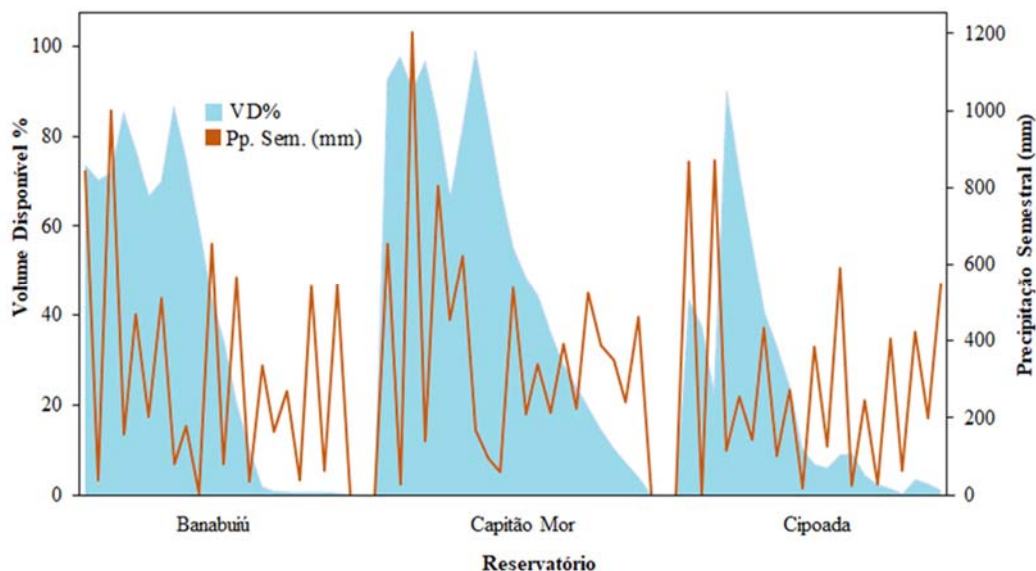
Onde: Transparência (Z) é dado em m; fósforo total (P) em  $\mu\text{g/L}$ ; P; nitrogênio total (N) em  $\text{mg/L}$  e clorofila a (Cla) em  $\mu\text{/L}$

## Resultados

As precipitações médias nos postos pluviométricos próximos dos reservatórios foram de 647 ( $\pm 265$ ), 774 ( $\pm 302$ ) e 583 mm/ano ( $\pm 230$ ), relativos ao Banabuiú, Capitão Mor e Cipoada, respectivamente. Esses valores foram muito próximos das médias normais para 30 anos das estações pluviométricas, que seriam de 627, 676 e 523 mm anuais. Entretanto, o ano de 2012 foi particularmente seco, com precipitações que ficaram 71, 73 e 50% abaixo de suas respectivas médias. Os anos seguintes apresentaram precipitações ligeiramente menores que as normais, sem permitir uma compensação de déficit de aporte hídrico. Para o ciclo anual a evolução das precipitações no período de estudo indicou coeficiente de correlação (r) negativo nos postos pluviométricos (-0.580, -0.382 e -0.477). Esse fato, somado às elevadas taxas de evaporação características do clima na região e às retiradas de vazão regularizadas explicam o rápido abatimento de volumes reservados. A Figura 2 mostra a variação dos volumes médios semestrais nos reservatórios ao longo do período de estudo, bem como as precipitações semestrais. Em ordem de redução do VD% o Capitão Mor (55%) foi o menos afetado, seguido pelo Banabuiú (40%) e Cipoada (23%).

As temperaturas médias nas amostras de águas dos reservatórios variaram pouco (26.6° a 31.1° C), com média de 28.7° C ( $\pm 1.4$ ). Apesar de não haver diferença significativa entre os reservatórios, no segundo semestre as temperaturas foram cerca de um 1.5° C inferiores às do primeiro semestre. As causas prováveis são: a ação mais intensa dos ventos no segundo semestre, com favorecimento à mistura e uniformização da temperatura, a coleta de amostras em áreas próximas ao barramento, em que a coluna d'água é mais profunda e, o horário de coleta.

As concentrações de N, P e Cla foram distintas entre os reservatórios (Tabela 3). O Cipoada estava em pior situação. O mesmo pode ser afirmado em relação à contagem total de cianobactérias e à transparência da água. As diferenças também foram verificadas com base no teste de Kruskal Wallis (KW). Neste caso, exceto para o fósforo total nos reservatórios Banabuiú e Cipoada, os resultados mostraram diferenças significativas ( $p < 0.05$ ) para os demais parâmetros. Para a comparação de resultados semestrais de cada ano, entretanto, não houve diferença significativa em relação N, P, Cla e CB.



**Figura 2.** Variação semestral do volume disponível e da precipitação nos postos próximos dos açudes do estudo (janeiro de 2008 a junho de 2018).

**Tabela 3.** Características dos reservatórios do estudo

Reservatório	Descrição	N (mg/L N)	P (mg/L P)	Cl <sub>a</sub> (µg/L)	Z (m)	Cianobactéricas (células/mL)
Banabuiú	Média	2.50	0.14	45	0.70	1.73E+05
	Mediana	1.69	0.11	24	0.71	1.42E+05
	Mínimo	0.16	0.01	2	0.25	3.49E+03
	Máximo	11.30	0.80	186	1.20	7.70E+05
	CV	0.961	0.921	0.975	0.339	0.882
Capitão-Mor	Média	0.52	0.05	6	1.41	5.14E+04
	Mediana	0.52	0.03	5	1.40	1.06E+04
	Mínimo	0.03	0.01	1	0.85	3.30E+01
	Máximo	1.53	0.21	24	2.55	6.10E+05
	CV	0.670	0.996	0.753	0.302	2.328
Cipoada	Média	5.19	0.15	138	0.37	3.97E+05
	Mediana	4.10	0.11	83	0.39	2.79E+05
	Mínimo	0.16	0.01	6	0.20	1.85E+04
	Máximo	16.76	0.59	552	0.70	2.28E+06
	CV	0.797	0.898	0.978	0.309	1.059

Ao considerar a resolução CONAMA 357/05, para águas doces de Classe 2, o nível de atendimento ao critério de clorofila a – limite de 30 µg/L - foi de 60% para amostras coletadas no Banabuiú, 100% no Capitão Mor e somente 6% no Cipoada. Para o caso das concentrações de fósforo total os percentuais de atendimento foram de 10, 63 e 12%, respectivamente. O limite de fósforo considerado na 357/05 foi de 0.030 mg P/L. Os valores de CB foram considerados em relação ao limite de 50000 células/mL ( $\equiv 5 \text{ mm}^3/\text{L}$ ). Os percentuais de conformidade foram de 23, 86 e 6%, para o Banabuiú, o Capitão Mor e o Cipoada, respectivamente.

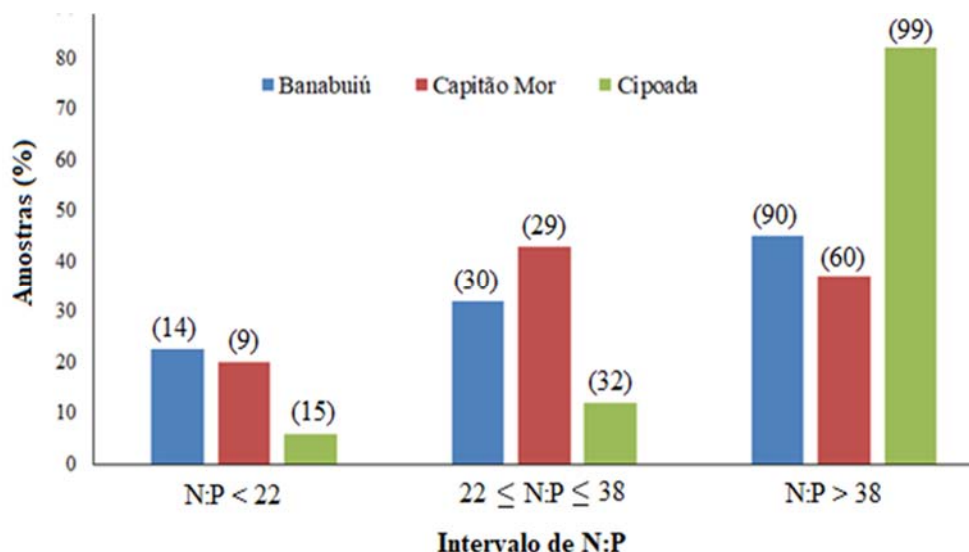
Os resultados sobre os graus de conformidade quanto ao estado trófico dos reservatórios mostraram que, em Banabuiú e o Cipoada estão mais próximos, enquanto as águas dos Capitão Mor se distinguem como melhores que as daqueles. Cunha *et al.* (2013b) ressaltam que o grau de conformidade com as guias normativas é frequentemente baixa em relação a nutrientes, com destaque para o fósforo total. Também, a conformidade normativa aumenta com o nível de coleta e de tratamento de esgotos nas áreas de montante e cercanias dos reservatórios.

A razão N:P foi maior no reservatório Cipoada com valor médio igual a 88 ( $\pm 57$ ), seguido do Banabuiú com 47 ( $\pm 38$ ) e do Capitão Mor com 38 ( $\pm 28$ ). Os resultados correspondem à ordem inversa dos volumes médios disponíveis nos reservatórios. Ainda assim, a influência de VD% pode ser limitada e cada reservatório tem características próprias quanto ao valor de N:P. O fato é que houve predominância de valores de N/P > 38 em todos os reservatórios, sendo maior no Cipoada, seguido do Banabuiú e do Capitão Mor. É importante ainda, considerar que os resultados de N:P em reservatórios do Trópico Semiárido parece refutar a ideia sugerida por Smith *et al.* (1983; 1995) e por Nöges *et al.* (2008), em que a limitação de nitrogênio favorece ao predomínio de CB

Figura 3 mostra os percentuais de amostras nos três reservatórios para os intervalos de N:P. O gráfico traz ainda os valores médios de N:P para cada intervalo nos reservatórios (valores entre parênteses). Ficou destacado que nos três reservatórios predomina o estado de limitação por fósforo. Porém, as outras faixas, a de limitação de N (quando N:P < 22) e a de alternância ( $22 \leq \text{N:P} \leq 38$ ) não devem ser desprezadas, pois a dinâmica nutrientes nos corpos lânticos do semiárido tem caráter intenso.

Os resultados mostraram que o fósforo prevalece como nutriente limitante e a redução do VD% tende a favorecer o incremento de N:P. Um exame complementar é oferecido pela Análise de Componentes Principais (ACP), com abordagem sobre as cargas (*loadings*) das distintas variáveis. As cargas podem ser consideradas como medida da importância relativa de cada variável em relação às componentes principais. Os respectivos sinais, positivos ou negativos, apontam relações de proporção direta ou inversa (Hair *et al.*, 2009). Para o emprego da ACP foram consideradas as variáveis N, P, N:P, Cla, CB, VD% e Pp, e computadas com base em valores padronizados para evitar efeito de escala.





**Figura 3.** Percentual de amostras do estudo nas faixas de razão N:P e os valores médios das razões (entre parênteses) para as diferentes faixas, nos respectivos reservatórios.

As duas componentes principais (CP) sobre os dados de cada reservatório explicaram 63, 56 e 63% da variância total nos reservatórios Banabuiú, Capitão Mor e Cipoada, respectivamente. As variáveis de maior peso foram N e *Cl<sub>a</sub>* na CP1 do Banabuiú e, N:P e CB, na CP2. Na CP1 do Capitão Mor as cargas mais elevadas foram das variáveis N e N:P, sendo P e VD% na CP2. No Cipoada, P e *Cl<sub>a</sub>* apresentaram cargas maiores na CP1 e N:P e Pp na CP 2.

Cabe observar que os valores de explicação da variância a partir de VD% apareceram como terceira de variável de maior carga, com sinal negativo, na CP1 dos três reservatórios. No caso da CP2 a carga do VD% esteve próxima da carga da variável precipitação (Pp) para os reservatórios Capitão Mor e Cipoada. Entretanto, a carga da Pp foi pouco relevante no Banabuiú. Há nisso uma indicação de que o porte do reservatório pode interferir na dinâmica de ação da eutrofização. A Figura 4 contém os *loadings* dos parâmetros em cada reservatório.

Os achados do estudo apontam que as concentrações de nitrogênio total podem ter impacto equivalente às de fósforo, ainda que esse nutriente seja referenciado como limitante. Para tal afirmação deve se levar em conta o grau de correlação de N com P e com *Cl<sub>a</sub>*. A Figura 5 ressalta isso, com base no total de amostras coletadas nos três reservatórios (Figura 5). Também, há que se ponderar que sob a ótica de aporte antrópico é mais viável fazer controle de nitrogênio.

Os valores do IET médio e dos subíndices obedeceram a mesma ordem verificada com os resultados já mostrados na Tabela 3. O mais eutrofizado foi o Cipoada, seguido do Banabuiú e do

Capitão Mor. O teste de ANOVA (com  $\alpha = 0.05$ ), empregado em razão dos resultados do índice e subíndices apresentarem coeficientes de variação baixos, ratificou esta ordem. Não houve diferença significativa entre os resultados obtidos durante o primeiro e segundo semestres. No Cipoada 90.5% das amostras indicaram hipertrofia e o restante, eutrofia. No Banabuiú foram 76.2% com hipertrofia e o restante eutrofia. No Capitão Mor, praticamente todas as amostras apresentaram status de Eutrófico.

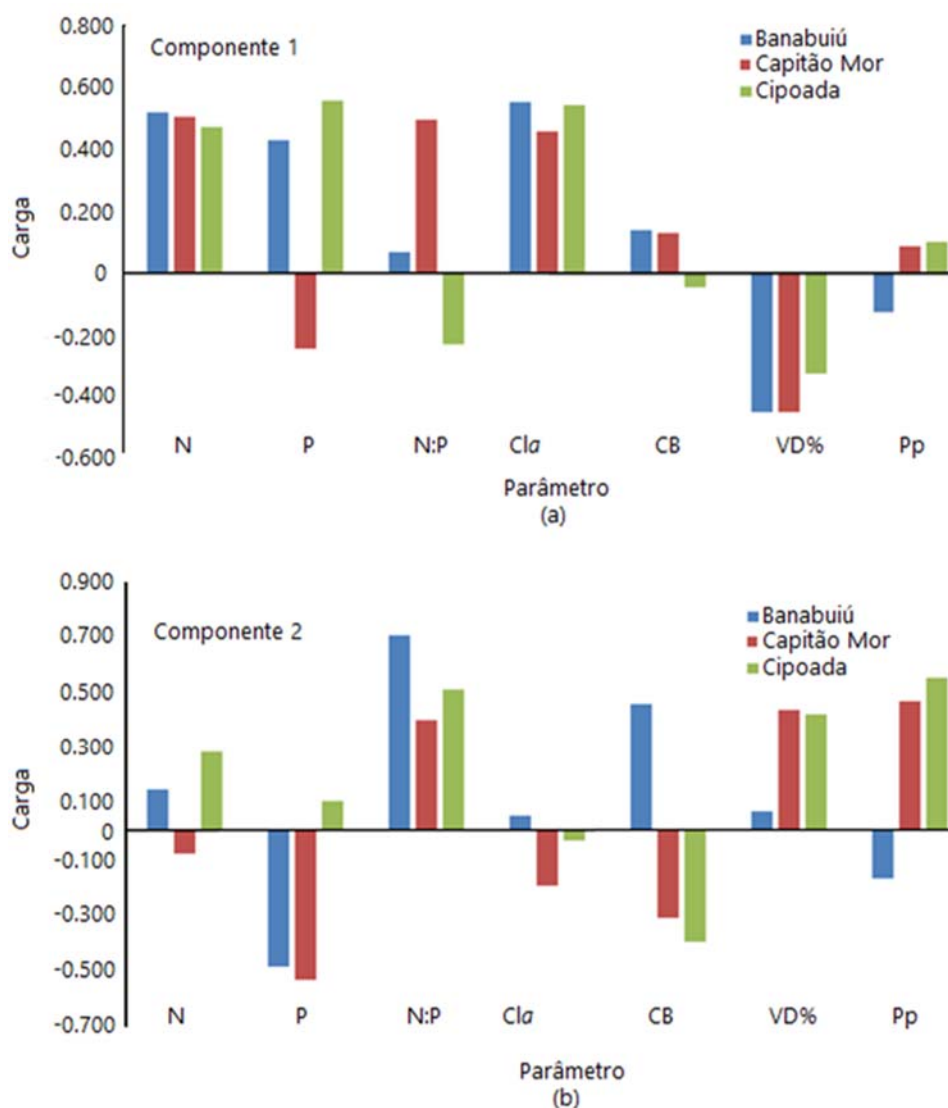
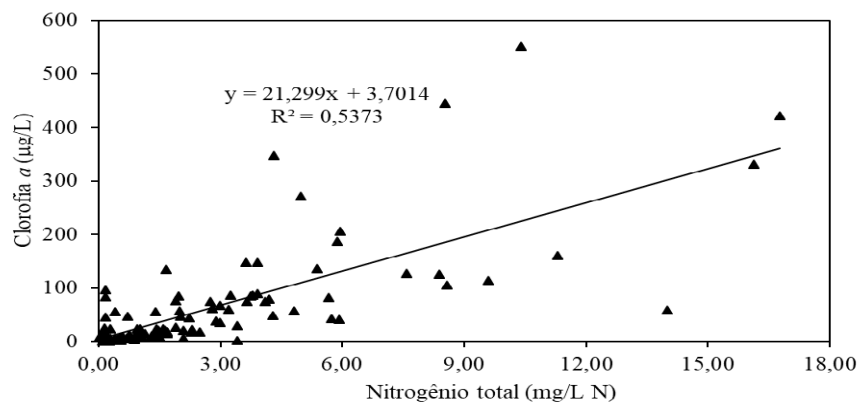
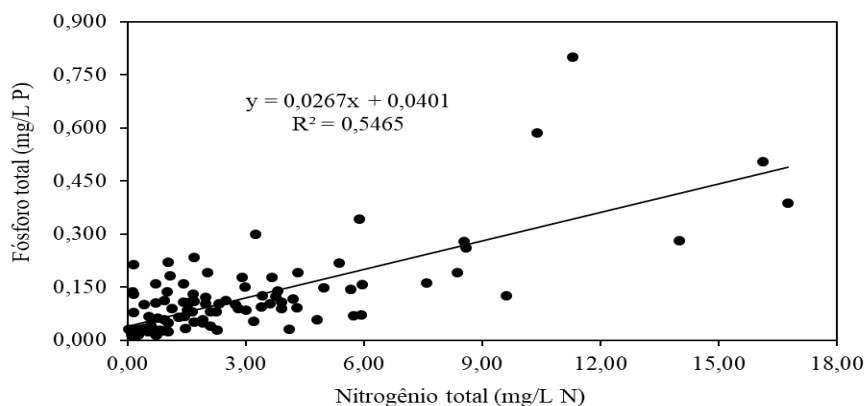


Figura 4. Cargas (loadings) de ACP nas Componentes Principais 1 (a) e 2 (b), nos reservatórios do estudo.



(b)



(a)

**Figura 5.** Variação de fósforo total (a) e de clorofila a (b) com as concentrações de nitrogênio total, com base no conjunto total de amostras coletadas nos três reservatórios.

**Tabela 4.** Índice de Estado Trófico nos reservatórios Banabuiú, Capitão Mor e Cipoada

Reservatório	Descrição	IET <sub>P</sub>	IET <sub>Cla</sub>	IET <sub>N</sub>	IET <sub>Z</sub>	IET
Banabuiú	Média	71	64	62	66	66
	CV	0.156	0.140	0.223	0.101	0.127
	Mín – Max	41-55	37-44	28-41	54-56	47-49
Capitão-Mor	Média	55	44	41	56	49
	CV	0.188	0.238	0.292	0.091	0.121
	Mín – Max	42-82	15-62	21-61	41-67	35-60
Cipoada	Média	71	75	72	75	73
	CV	0.178	0.120	0.228	0.063	0.125
	Mín – Max	39-96	48-93	28-95	65-83	51-90

Legenda: Z =Transparência; P=fósforo total; N=nitrogênio total e Cla = clorofila a

Nos três reservatórios predominou a seguinte relação entre os subíndices:  $IET_P > IET_Z \geq IET_{Cl} \geq IET_N$ . Sob esta condição as algas dominam a atenuação da luz e pode haver limitação de N, conforme sugere Carlson (1991). Enquanto o  $IET_N$  exibiu valores de CV mais elevados entre os subíndices o  $IET_Z$  apresentou menor variação. Esse último subíndice tem, portanto, menor peso sobre a variação do IET médio. Quanto à transparência, cabe lembrar que a atenuação da luz na água, por absorção e espalhamento, é afetada pelo conteúdo da massa líquida como um todo e não somente pela biomassa algal. Portanto, na água há constituintes que trazem imprecisão implícita nas medidas de transparência (Lorenzen, 1980; Megard *et al.*, 1980). Maia *et al.* (2015) ressaltam que a transparência pode ser afetada pela elevada turbidez decorrente do material não algal em suspensão, não exibindo grau de trofia fidedigno da água. Portanto, é razoável empregar o  $IET_Z$  para informação pública, mas não para avaliar o real status trófico do corpo lântico. Uma discussão adicional diz respeito a utilização do  $IET_N$ . Apesar do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) do IET (P, Cl, N, Z) com o IET (P, Cl) ter sido de 0.986 a determinação desse nutriente permanece necessária à avaliação da razão N:P.

Não houve correlação significativa entre qualquer um dos subíndices de IET com a razão N:P, ou com a contagem de cianobactérias. O mesmo pode ser afirmado em relação à precipitação. No caso do VD% a correlação foi claramente negativa, porém o  $r$  médio mais elevado foi de -0.551 para o  $IET_{Cl}$ . Resultado melhor ( $r = -0.775$ ) foi verificado no Banabuiú, sugerindo novamente que o porte do reservatório deve influir nestas relações.

Em relação à evolução no período de estudo, com os dados agrupados, os ciclos anuais mostraram tendência de elevação do IET ( $r = 0.304$ ), sendo o  $IET_P$  de resposta ligeiramente maior ( $r = 0.348$ ). No caso do Banabuiú os valores de  $r$  foram mais elevados. Isto corrobora para a ideia de que a dinâmica de nutrientes em grandes reservatórios seja mais estável.

### Conclusões

Os achados do estudo permitiram concluir que os três reservatórios apresentaram concentrações de P, de Cl e contagem de total de cianobactérias acima dos valores referidos como limites para qualidade ambiental satisfatória, com base na CONAMA 357/05. Apesar da norma ambiental não tratar de nitrogênio total, os valores observados foram elevados e apresentaram correlação positiva com P e Cl. As concentrações de nitrogênio total podem ter impacto equivalente às de fósforo. O reservatório Cipoada apresentou pior condição, seguido do Banabuiú e do Capitão Mor.

Razões N:P > 38 predominaram no Cipoada e no Banabuiú, sendo maior no primeiro. No Capitão Mor predominou o intervalo de 22 a 38 para a razão N:P. Este último intervalo, assim como o que indica estado de limitação de N (quando N:P < 22) não devem ser ignorados, pois a dinâmica

de N e P nos corpos lênticos do semiárido é mais intensa que em regiões com caráter climático diferente.

Os reservatórios apresentaram valores de IET levados, indicando hipertrofia no Cipoda e no Banabuiú, e eutrofia no Capitão Mor. A relação entre os subíndices de IET foi:  $IET_P > IET_Z \geq IET_{Cla} \geq IET_N$ . O subíndice relativo à transparência (Z) teve pouco peso sobre a variação do IET e suas respectivas classes. Sua mensuração está menos associada à produtividade primária que os demais parâmetros. A correlação elevada de N com *Cla* e com P foi reiterada no cômputo do IET e subíndices nas águas dos reservatórios do estudo.

O declínio nas precipitações médias junto aos reservatórios para o intervalo do estudo (fevereiro de 2008 a maio de 2018) colaborou para um déficit crescente de volume de água disponível. A redução do volume disponível potencializa o processo de eutrofização, com incremento de nutrientes e, por consequência, de clorofila a e da contagem de cianobactérias.

### Agradecimentos

Os Autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH.

### Referências bibliográficas

- Alvalá, R. C. S., Cunha, A. P. M. A., Brito, S. S. B., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Moraes, O. L. L., Carvalho, M. A. (2017) Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *Anais da Academia Brasileira de Ciência*, **89**(5),1-15. Publicação eletrônica. doi: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- APHA-AWWA/W, American Public Health Association - American Water Works Association/Water (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21<sup>st</sup> Edition, Environment Federation, Washington DC.
- Barcker, L. C., Manassaram-Baptiste, D., Leprell, R., Bolton, B. (2015) Cyanobacteria and algae blooms: review of health and environmental data from the Harmful Algal Bloom-related Illness Surveillance System (HABISS) 2007–2011. *Toxins*, **7**, 1048-1064. doi: <https://doi.org/10.3390/toxins7041048>
- Barbosa, J. E. L., Medeiros, E. S. F., Brasil, J.; Cordeiro, R.S.; Crispim, M. C. B.; Da Silva, G. H. G. (2012) Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. *Acta Limnológica Brasiliensia*, **24**(1), 103-118. doi: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000030>
- Barica, J. (1990). Seasonal variability of N:P ratios in eutrophic lakes. *Hydrobiologia*, **191**(1), 97-103.
- BRASIL (2006) *Nova delimitação do semiárido brasileiro*. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. Ministério da Integração Nacional, Brasília, DF, 35 pp.
- BRASIL (2005) *Relatório final do grupo de trabalho interministerial para redelimitação do semiárido nordestino e do polígono das secas*. Ministério da Integração Nacional, Brasília, DF. 118 pp
- Bukowska, A., Kalinski, T., Koper, M., Kostrzewska-Szlakowska, I., Kwiatowski, J., Mazur-Marzec, H., Jasser, I. (2017) Predicting blooms of toxic cyanobacteria in eutrophic lakes with diverse cyanobacterial communities. *Scientific Reports*, **7**, 8342, 2017. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08701-8>
- Carlson, R. E. (1977) A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, **22**(2), 361-369.



- Carlson, R.E. (1991) *Expanding the Trophic State Concept to Identify Non-Nutrient Limited Lakes and Reservoirs*. In: Carpenter, L., Ed., *Proceedings of a National Conference on Enhancing the States' Lake Management Programs*, North American Lake Management Society, Chicago, 59-71.
- Catherine, Q., Susanna, W., Isidora, E-S., Mark, H., Aurélie, V., Jean-François, H. (2013) A review of current knowledge on toxic benthic freshwater cyanobacteria e Ecology, toxin production and risk management. *Water Research*, **47**(15), 5464-5479. doi: <https://doi.org/10.1016/iwatres.2013.06.042>
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005) *Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005*, Ministério do Meio Ambiente, Brasil Acesso em: 07 fev. 2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>
- Cunha, D.G.F., Calijuri, M. C., Lamparelli, M. C. (2013a) A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI<sub>tr</sub>). *Ecological Engineering*, **60**(1), 126-134, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>
- Cunha, D.G.F., Calijuri, M. C., Lamparelli, M. C., Mengo Jr., N. (2013b) Resolução CONAMA 357/2005: análise espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005-2009). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **18**(2), 159-168
- Dokulil, M. T. (2016) Climate impacts on ecohydrological processes in aquatic systems. *Ecology and Hydrobiology*, **16**(1), 66-70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.08.001>
- Downing, J. A., Mccauley, E. (1992) The nitrogen:phosphorus relationship in lakes. *Limnology and Oceanography*, **37**(5), 936-945. doi: <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.5.0936>
- Gunkel, G., Lima, D., Selge, F., Sobral, M., Calado, S. (2015) Aquatic ecosystem services of reservoirs in semi-arid areas: sustainability and reservoir management. *River Basin Management VIII*, 187-200.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Taham, R.L. (2009) *Análise Multivariada de Dados*. 6ª edição traduzida. ARTMED/BOOKMAN, São Paulo. 688 pp
- Havens, K. E., James, R. T., East, T. L., Smith, V. H. (2003) N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental Pollution*. **122**(3), 379-390. doi: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00304-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00304-4)
- He, X., Liu, Y., Conklin, A., Westrick, J., Weavers, L.K., Dionysiou, D.D., Lenhart, J.J., Mouser, P.J., Szlag, D., Walker, H.W. (2016) Toxic cyanobacteria and drinking water: impacts, detection, and treatment. *Harmful Algae*, **54**, 174-193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2016.01.001>
- Huisman, J., Matthijs, H. C., Visser, P.M. (2006) *Harmful Cyanobacteria*. Springer Science and Business Media. 243p.
- Klausmeier, C. A.; Litchman, E.; Daufresne, T.; Levin, S.A. (2004) Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. *Nature*. **429**, 171-174. doi: <https://doi.org/10.1038/nature02454>
- Kratzer, C. R.; Brezonik, P.L. (1981) A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin*, **17**(4), 713-715. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282.x>
- Lamparelli, M. C. (2004) *Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento*. Tese de Doutorado, 207f. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Lopez, C. B.; Jewett, E.B.; Dortch, Q.; Walton, B. T.; Hudnell, H. K. (2008) *Scientific assessment of freshwater harmful algal blooms*. Interagency Working Group on Harmful Algal Blooms, Hypoxia, and Human Health of the Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology, Washington, DC.
- Lorenzen, M. W. (1980) Use of chlorophyll-Secchi disk relationships. *Limnology and Oceanography*, **25**(2), 371-372. doi: <https://doi.org/10.4319/lo.1980.25.2.0371>
- Maia, A. A. D., Carvalho, S. L., Carvalho, F. T. (2015) 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*, **10**(4), 613-622. doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020040121258>
- Markou, G., Vandamme, D., Muylaert, K. (2014) Microalgal and cyanobacterial cultivation: the supply of nutrients. *Water Research*, **65**, 186-202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.025>
- Megard, R.O., Settles, J.C., BoyeR, H. A, Combs JR., W. S. (1980) Light, Secchi disks, and trophic states. *Limnology and Oceanography*, **25**(2), 373-377. doi: <https://doi.org/10.4319/lo.1980.25.2.0373>

- Merel, S., Walker, D., Chicana, R., Snyder, S., Baurès, E., Thomas, O. (2013) State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins. *Environment International*, **59**, 303–327. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.06.013>
- Nöges, T., Laugaste, R., Nöges, P., Tönno, I.(2008) Critical N:P ratio for cyanobacteria and N<sub>2</sub>-fixing species in the large shallow temperate lakes Peipsi and Vortsjarv, North-East Europe. *Hydrobiologia*, **599**(1), 77–86. doi: <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9195-x>
- Paerl, H. W., Huisman J. (2008) Blooms like it hot. *Science*, **320**(5872), 57–58. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1155398>
- Paerl, H. W., Huisman, J. (2009) Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, **1**(1), 27–37. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>
- Paerl, H. W., Otten, T. G. (2013) Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences and controls. *Microbial Ecology*, **65**(4), 995–1010. doi: <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y>
- Paerl, H. W., Paul, V.J. (2012) Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research*, **46**(5), 1349-1363. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.002>.
- Paulic, M., Hand, J., Lord, L. (1996) *Water-quality Assessment for the State of Florida*. Section 305(b) Main Report. Tallahassee, FL: Florida Department of Environmental Protection.
- Pearson, L. A., Dittmann, E., Mazmouz, R., Ongley, S. E., D’Agostino, P. M., Neilan, B. A. (2016) The genetics, biosynthesis and regulation of toxic specialized metabolites of cyanobacteria. *Harmful Algae*, **54**, 98–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.11.002>
- Rasmussen, B., Fletcher, I. R., Brocks, J. J., Kilburn, R. R. (2008) Reassessing the first appearance of eukaryotes and cyanobacteria. *Nature*, **455**, 1101-1104. doi: <https://doi.org/10.1038/nature07381>
- Ribeiro, E. C. M., Silva, M.M.C. (2010) *Um retrato do semi-árido cearense*. Secretaria do Planejamento e Gestão – SEPLAG, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE. Texto para Discussão nº 76. Fortaleza-CE, Janeiro/2010. 40 pp.
- SRH/CE, Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (2018) *Atlas eletrônico dos recursos hídricos do Ceará*. Acesso em: 07 fev. 2018. Disponível em: [http://atlas.srh.ce.gov.br/infra-estrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?c\\_d\\_acude=175&status=0](http://atlas.srh.ce.gov.br/infra-estrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?c_d_acude=175&status=0)
- SRH/CE, Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (2018) *Calendário de chuvas do Estado do Ceará*. Portal Hidrológico. Acesso em: 22 agosto. 2018, disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/app/pagina/show/186>
- Sepulveda-Jauregul, A., Hoyos-Santillan, J., Martinez-Cruz, K., Katey M., Walter Anthony, K.M.W., Casper, P., Belmonte-Izquierdo, Y., Thalasso, F. (2018) Eutrophication exacerbates the impact of climate warming on lake methane emission. *Science of the Total Environment*, **636**, 411-419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.283>
- Smith, V. H. (1983) Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*, **221**(4611), 669-671. doi: <https://doi.org/10.1126/science.221.4611.669>
- Smith, V. H., Bierman, V. J., Jones, B. L., Havens, K. E. (1995) Historical trends in the Lake Okeechobee ecosystem IV. Nitrogen: phosphorus ratios, cyanobacterial dominance, and nitrogen fixation potential. *Archiv für Hydrobiologie*, **107**, 71-88.
- Smith, V. H., Joye, S. B., Howarth, R. W. (2006) Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, **51**(1), 351-355. doi: [https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1\\_part\\_2.0351](https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351)
- Sulis, A., Buscarinu, P., Soru, O., Sechi, G. M. (2014) Trophic State and Toxic Cyanobacteria Density in Optimization Modeling of Multi-Reservoir Water Resource Systems. *Toxins*, **6**, 1366-1384. doi: <https://doi.org/10.3390/toxins6041366>
- Toledo, A., Talarico M., Chinez, S. J., Agudo, E. G. (1983) A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: *12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1-34. Camboriú-SC, Setembro de 1983.

- Wagner, C., Adrian, R. (2009) Cyanobacteria dominance: quantifying the effects of climate change. *Limnology and Oceanography*, **54**(6), 2460–2468. doi: [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2460](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2460)
- Wen, G., Li, X., Qiu, X., Cheng, Y., Sun, Y., Huang, T. (2016) *Characteristics of Water Pollution in Typical Reservoirs*. In: *Water Pollution and Water Quality Control of Selected Chinese Reservoir Basins. Part I*, 25-94. Edited by Tinglin Huang. Springer International Publishing Switzerland, Heidelberg, 514 pp.
- Wu, D., Yana, H., Shang, M., Shan, K., Wang, G. (2017) Water eutrophication evaluation based on semi-supervised classification: a case study in Three Gorges Reservoir. *Ecological Indicators*, **81**, 362-372, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.004>
- Zhang, Y., Song, C., Ji, L., Liu, Y., Xiao, J., Cao, X., Zhou, Y. (2018) Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes. *Science of the Total Environment*, **627**, 1294-1302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.327>