

REVISTA AIDIS

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

RELAÇÃO ENTRE FÓSFORO TOTAL E VAZÃO AFLUENTE NOS PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS RURAIS DO ESTADO DO CEARÁ NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Maria de Jesus Delmiro da Rocha¹
* Iran Eduardo Lima Neto¹

RELATIONSHIP BETWEEN TOTAL PHOSPHORUS AND AFLUENT FLOW IN MAIN RURAL RESERVOIRS OF THE STATE OF CEARÁ IN BRAZILIAN SEMIARID

Recibido el 23 de enero de 2019; Aceptado el 6 de febrero 2020

Abstract

Water quality in interannual reservoirs in the Brazilian semiarid region is extremely important, mainly due to eutrophication, whose excessive nutrient input, notably total phosphorus, is a determining factor in this process. In this study, the behavior of the total phosphorus concentration was modeled as a function of the inflow in two serial reservoirs in the semiarid region of Ceará: Orós and Castanhão. Simplified models were proposed relating these variables through regression analysis. A water quality analysis was also carried out regarding compliance with CONAMA Resolution 357/2005 for total P and concentration values exceeded by 10% and 90% of the evaluated time, were obtained and discussed. Finally, a scenario analysis of the impact of different concentrations of total affluent P on the total P concentration in the water column of the reservoirs was performed. The results showed that the total phosphorus concentration presents a simple dilution regime in the proposed models ($P < 0.0001$), responding inversely to the inflow. There was also a decrease in the concentration in the upstream reservoir compared to the downstream one, corroborating the results available in the literature for other regions. Finally, it was observed that the reservoirs were in disagreement with the Resolution for total P in 89.5% and 82.4% of the time analyzed in Orós and Castanhão, respectively, and that they do not reach the limit values for total P concentration for class II even though the inflow falls within the resolution for lotic environments.

Keywords: inflow, reservoirs, semiarid, total phosphorus, water quality.

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

* Autor correspondente: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Bloco 713, 1º Andar, Centro de Tecnologia, CEP 60451-970, Fortaleza, Ceará, Brasil. Email: iran@deha.ufc.br

Resumo

A qualidade da água nos reservatórios interanuais do semiárido brasileiro é de extrema importância, principalmente devido à eutrofização, cujo aporte excessivo de nutrientes, notadamente de fósforo total, é fator determinante nesse processo. No presente estudo modelou-se o comportamento da concentração de fósforo total em função da vazão afluente em dois reservatórios rurais em série do semiárido cearense: Orós e Castanhão. Foram propostos modelos simplificados relacionando essas variáveis por meio de análise de regressão. Realizou-se também uma análise da qualidade da água quanto ao atendimento a Resolução CONAMA 357/2005 para P total e se obtiveram os valores de concentração superados em 10% e 90% do tempo avaliado, C_{10} e C_{90} . Por fim, realizou-se uma análise de cenários do impacto de diferentes concentrações de P total afluente na concentração P total na coluna de água dos reservatórios. Os resultados mostraram que a concentração de fósforo total apresenta regime de diluição simples nos modelos propostos ($P < 0.0001$), respondendo inversamente à vazão afluente. Verificou-se também uma diminuição da concentração de fósforo do reservatório de montante em relação ao de jusante, corroborando os resultados disponíveis na literatura para outras regiões. Observou-se, por fim, que os reservatórios estão em desacordo com a Resolução CONAMA 357/2005 para P total em 89.5% e 82.4% do tempo analisado no Orós e Castanhão, respectivamente, e que não atingem os valores limites de concentração P total para a classe II ainda que a vazão afluente se enquadre na resolução para ambientes lóticos.

Palavras chave: fósforo total, qualidade da água, reservatórios, semiárido, vazão afluente.

Introdução

O processo de eutrofização artificial em reservatórios depende, dentre outros fatores, do aporte de nutrientes induzido pela ação antrópica. Notadamente o fósforo possui o maior impacto nesse processo, pelo qual muitos lagos e reservatórios em todo o mundo encontram-se afetados e, conseqüentemente, comprometidos quanto aos seus múltiplos usos (Lamparelli, 2004; Schindler *et al.*, 2008; Sharpley *et al.*, 2013; Pacheco & Lima Neto, 2017; Araújo *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2019; Wiegand *et al.*, 2020).

As características de uso e ocupação do solo da bacia impactam diretamente o aporte de nutrientes e a qualidade da água de rios e reservatórios. Os principais fatores que intensificam o aporte de fósforo para os corpos hídricos em uma bacia são os efluentes domésticos, as fontes pontuais, as fontes difusas, descargas de águas residuárias de residências isoladas, o uso excessivo de detergentes não biodegradáveis, o carreamento do solo, os agrossistemas e também a pecuária (Jorgensen & Vollenweider, 2000; Mekonnen & Hoekstra, 2018).

Dada a complexidade dos elementos que contribuem para o aporte de fósforo aos corpos hídricos, muitos métodos e modelos são propostos baseando-se em coeficientes de uso do solo e atividades na bacia (Johnes, 1996; Parry, 1998; Sperling, 2014). Entretanto, por essas metodologias requererem dados minuciosos quanto à pecuária, agricultura, condição e tipo de solução de saneamento básico, suas aplicações demandam maiores esforços na caracterização da área estudada, além das incertezas associadas aos coeficientes para cada bacia.

O conhecimento do padrão temporal da carga afluyente de fósforo total advinda de fontes pontuais e difusas possibilita avaliar o principal tipo de fonte poluidora a um lago ou reservatório por meio do estudo e da proposição de modelos empíricos que correlacionem vazão afluyente e concentração de fósforo total, uma vez que a estimativa do aporte de nutrientes por meio da vazão e balanço de massa tem-se mostrado uma importante ferramenta em estudos de caracterização qualitativa desses ambientes (Carney *et al.*, 1993; Young *et al.*, 1996; Holas *et al.*, 1999). Ademais, o fluxo de entrada de rios e tributários, cujas bacias apresentam intensiva atividade antrópica, apresentam significativa carga afluyente de poluentes e são, majoritariamente, a causa de diversos problemas ecológicos aos corpos hídricos lênticos em que aportam (Krug, 1993; Noges *et al.*, 1998; De Farias Mesquita *et al.*, 2020, Wiegand *et al.*, 2021).

Assim, o presente estudo tem como objetivos avaliar o comportamento da concentração de fósforo total para diferentes níveis de vazão em reservatórios rurais do semiárido brasileiro; propor um modelo simplificado para correlacionar esses parâmetros; analisar, a partir dos modelos propostos, se são as fontes pontuais ou difusas as mais significativas aos reservatórios; e verificar se a concentração comporta-se dentro de padrões esperados para reservatórios em série, situação em que se encontram os estudados.

Buscou-se também avaliar a qualidade da água quanto ao atendimento aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para concentração de fósforo total, considerando Classe II de enquadramento para os corpos hídricos, além de obter os valores da concentração superados em 10% e 90% do tempo estudado, respectivamente C_{10} e C_{90} .

Por fim, avaliaram-se cenários de melhoria da qualidade da água afluyente quanto ao parâmetro fósforo total e o seu respectivo impacto nos reservatórios. Ressalta-se que estudos desse tipo ainda são escassos, principalmente no semiárido brasileiro.

Metodologia

O presente estudo abrange os reservatórios em sequência Orós e Castanhão, localizados nas sub-bacias cearenses do Alto Jaguaribe e do Médio Jaguaribe, respectivamente. Junto a outras nove sub-bacias, estas integram as doze sub-bacias do estado do Ceará sendo a região do Alto Jaguaribe a maior e a região do Médio Jaguaribe a oitava maior em extensão territorial, equivalendo juntas a aproximadamente 25% do território do estado.

O aporte hídrico majoritário para os reservatórios estudados advém do rio Jaguaribe. A nascente deste rio localiza-se na região do Alto Jaguaribe seguindo então para o reservatório Orós e posteriormente para o reservatório Castanhão, até aportar no oceano Atlântico na costa litorânea estadual.

Totalmente inserida na região semiárida do estado, a sub-bacia do Alto Jaguaribe abrange uma área de 24639 km² sobre o domínio hidrogeológico cristalino predominando principalmente os tipos de solo neossolo litólico e argissolo vermelho e amarelo. O principal sistema sinótico atuante na região é a Zona de Convergência Intertropical, caracterizando o período chuvoso entre os meses de fevereiro e maio. Quanto ao uso e ocupação do solo, predomina uma economia baseada principalmente na agricultura de subsistência, na pecuária extensiva e no extrativismo vegetal com uma taxa média de urbanização de 50%, densidade populacional de aproximadamente 26 hab/km² e uma cobertura de saneamento básico de 46%. Nela, localiza-se o segundo maior reservatório do Ceará, o Orós, com uma capacidade de acumulação de 1940 hm³. Embora seja o maior da região, sua contribuição hídrica para esta é irrelevante, uma vez que seu barramento se localiza no exutório da bacia. Assim, possui como principais atribuições garantir a perenização do rio Jaguaribe a jusante além da oferta hídrica para as bacias subsequentes (Ceará, 2008, 2009).

A sub-bacia do Médio Jaguaribe, por sua vez, abrange uma área de 10504 km². Possui iguais características hidrogeológicas e climáticas da sub-bacia do Alto Jaguaribe, predominando, porém, principalmente os tipos de solo neossolo litólico, luvisolo crômico e planossolos. Trata-se de uma região com taxa média de urbanização de 49%, densidade populacional de aproximadamente 22 hab/km², com uma cobertura de saneamento básico de apenas 33% cuja economia é baseada majoritariamente nos setores de serviços e agropecuário. Localiza-se nela o reservatório Castanhão, com 6700 hm³ de capacidade de acumulação, configurando-se o maior reservatório do estado do Ceará (Ceará, 2008, 2009).

A vazão afluente aos reservatórios estudados foi determinada por meio de balanço hídrico diário onde os dados de vazão retirada do reservatório, o volume diário e a curva Cota-Área-Volume foram obtidos junto ao Portal Hidrológico do Ceará da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH, 2017). Já a precipitação média diária foi obtida junto a Funceme (2018) enquanto a evaporação média mensal das Normais Climatológicas em Brasil (2018). Os dados de concentração de fósforo total na coluna de água dos reservatórios também foram obtidos junto à COGERH (2017). Ressalta-se que as amostras são coletadas próximo ao barramento do reservatório, junto à captação, e as análises de qualidade da água foram realizadas conforme descrito pela APHA (2005). A Figura 1 apresenta a localização das sub-bacias e dos reservatórios estudados no estado do Ceará, Brasil.

Para estimar a carga afluente de fósforo total aos reservatórios foram utilizados o volume do reservatório (V), a vazão de saída (Q) e concentração de fósforo total na coluna de água (P). A partir dos dados, utilizou-se o modelo de balanço de massa em hipótese de mistura completa, sugerido por Vollenweider (1968), como base para obtenção da carga de fósforo total afluente. A Equação (1) apresenta este modelo, a Equação (2) apresenta a sua solução analítica e a Equação (3) apresenta o rearranjo do modelo para previsão da carga de fósforo total afluente.

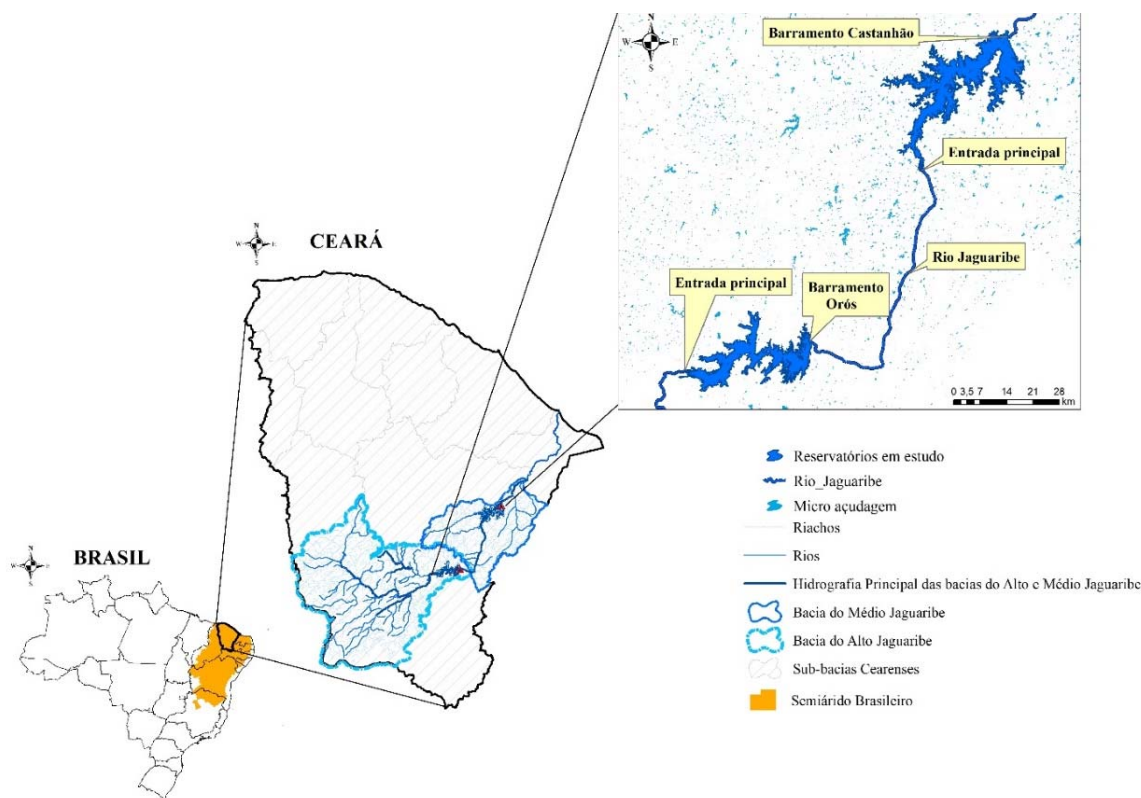


Figura 1. Localização dos reservatórios estudados, Orós e Castanhão, e suas respectivas sub-bacias no estado do Ceará- Brasil.

$$V \frac{dP}{dt} = W(t) - Q_s \cdot P - k \cdot V \cdot P \quad \text{Equação (1)}$$

$$P(t) = P_o \cdot e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)t} + \frac{W}{Q_s + k \cdot V} \left(1 - e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)t}\right) \quad \text{Equação (2)}$$

$$W(t) = \left(P(t) - P_o \cdot e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)t}\right) \cdot \frac{Q_s + k \cdot V}{\left(1 - e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)t}\right)} \quad \text{Equação (3)}$$

$P(t)$: Concentração de fósforo total ao longo do tempo (kg/m^3)

P_o : Concentração de fósforo total no instante inicial (kg/m^3)

T : Tempo (s)

V : Volume do reservatório (m^3)

W : Carga de fósforo afluyente (kg/s)

Q_s : Vazão de saída do reservatório (m^3/s)

k : $\frac{4}{\sqrt{\text{Tr}}}$, Coeficiente de decaimento do fósforo (ano^{-1}) proposto por Toné & Lima Neto (2018)

Tr : $\frac{V}{Q_s + E}$, Tempo de residência hidráulico do reservatório (ano)

E : Evaporação média (m^3/s)

A escolha do modelo transiente proposto pela Equação (2) adequa-se particularmente aos reservatórios estudados dada a elevada variação dos parâmetros V , Q e W em função do clima semiárido da região. Acrescenta-se, também, que em comparação aos reservatórios das regiões temperadas e tropicais, o coeficiente de decaimento do fósforo é mais elevado nos reservatórios do semiárido devido às maiores temperaturas da água, resultando assim em um efeito combinado de aumento da taxa de consumo pelas algas e de diminuição da viscosidade da água, favorecendo a sedimentação do fósforo (Toné & Lima Neto, 2018). Por esta razão, optou-se pela utilização do coeficiente de decaimento do fósforo proposto para reservatórios do semiárido brasileiro por Toné & Lima Neto (2018), em que este utilizou catorze reservatórios de quatro estados nordestinos, dos quais três eram reservatórios cearenses, assumindo-se então a representatividade para os reservatórios em análise.

Os valores de carga modelados foram comparados ao valor de carga média estimado pela COGERH e constantes no Inventário Ambiental de monitoramento de cada reservatório buscando-se avaliar a diferença média percentual e o coeficiente de variação. A partir da carga de fósforo total e da vazão afluyente, estimou-se a concentração de fósforo total afluyente para cada reservatório através da Equação (4).

$$W = C \cdot Q$$

Equação (4)

Onde

W: Carga de fósforo afluyente (kg/s)

C: Concentração de fósforo total (kg/m³)Q: Vazão afluyente (m³/s)

Assim, com os valores da concentração de fósforo total e vazão na seção de entrada dos reservatórios, ajustou-se um modelo simplificado para cada reservatório buscando identificar o comportamento desse parâmetro. Por meio de análise de regressão buscou-se obter a melhor correlação entre as variáveis, considerando a maior significância do coeficiente de correlação, em nível de significância de 5%, e a adequação às características reais do fenômeno estudado. Ademais, prosseguiu-se com análise de qualidade da água, nas seções de entrada e nos reservatórios, quanto ao atendimento aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, (Brasil, 2005), para a concentração de fósforo total, considerando Classe II de enquadramento para ambos os corpos hídricos. Obteve-se também os valores da concentração de fósforo total superados em 10% e 90% do tempo de análise caracterizando-os como as concentrações de referência C_{10} e C_{90} , respectivamente.

Por fim, realizou-se uma análise de cenários avaliando a concentração de P na coluna d'água dos reservatórios para diferentes concentrações de P na vazão afluyente. Tomou-se os valores P para vazão de entrada de 0.1 e 0.15 mg/L, obedecendo os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005

para classes II e III em ambientes lóticos, respectivamente, para assim avaliar se os reservatórios obedecem aos limites da classe que se enquadram ou a quais classes se adequam quanto a esse parâmetro.

Para obter a concentração de P total na coluna de água dos reservatórios nos cenários propostos utilizou-se a Equação (2) em regime permanente, assumindo-se para as variáveis volume (V) e tempo de residência hidráulico (TR) valores médios dentro do período estudado para cada reservatório, de maneira a se avaliar apenas o impacto da vazão afluente nessa variável. Tomou-se, então, a carga afluente (W) como produto da vazão afluente, obtida a partir dos modelos propostos para cada reservatório, com a concentração de fósforo total afluente normalizada para ambientes lóticos nas duas situações anteriormente descritas.

Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta a série volumétrica percentual e as respectivas concentrações de fósforo total nos reservatórios Orós e Castanhão, caracterizando a variação desses parâmetros ao longo do período de tempo estudado. A concentração, embora variável, apresentou uma tendência previsível aumentando gradualmente enquanto o volume no reservatório diminuiu progressivamente ao longo de todo o tempo de estudo, sendo esta contínua diminuição volumétrica consequência principal do período de seca prolongada no Nordeste. Ademais, o clima semiárido característico das sub-bacias em estudo é marcado pela elevada variabilidade na presença e intensidade das chuvas. Porém, estas precipitações esporádicas, mas de elevada intensidade, também podem contribuir significativamente para a degradação da qualidade da água do reservatório a longo prazo (Schulz, 2001).

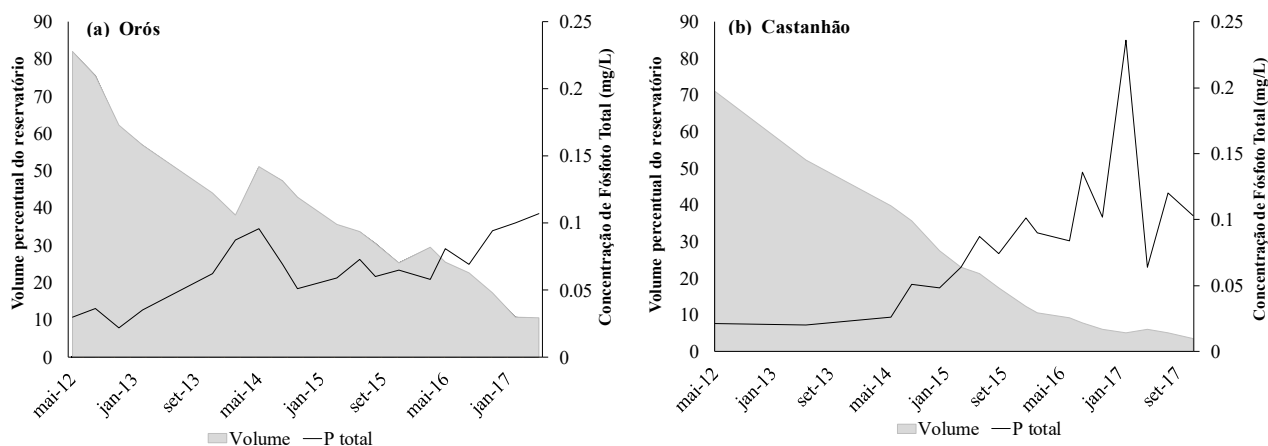


Figura 2. Variação da Concentração de Fósforo Total e do Volume percentual dos reservatórios (a) Orós e (b) Castanhão durante o período de tempo analisado.

Quanto ao parâmetro coeficiente de decaimento do fósforo total, apresenta-se na Tabela 1 o coeficiente de decaimento médio e o desvio padrão obtidos para ambos os reservatórios estudados por meio do modelo proposto por Toné & Lima (2018) para regiões semiáridas e pelos modelos propostos por Vollenweider (1968) e Salas e Martino (1991) para regiões temperadas e tropicais, respectivamente.

Tabela 1. Coeficiente de decaimento do fósforo estimado por diferentes modelos da literatura para os reservatórios estudados.

Reservatório / Modelo Proposto	Coeficiente de decaimento do fósforo (k) ano ⁻¹			
	Orós		Castanhão	
	\bar{k}	s	\bar{k}	s
Toné & Lima (2018)	3.3	1.2	3.1	1.0
Salas e Martino (1991)	1.6	0.6	1.6	0.5
Vollenweider (1968)	0.8	0.3	0.8	0.2

Observa-se um coeficiente mais elevado para o modelo de Toné & Lima (2018) em comparação aos demais. Ademais, os valores de coeficiente de decaimento do fósforo obtidos por este autor para os reservatórios rurais do Nordeste variaram de 2.23 a 9.05 ano⁻¹, faixa em que se encontra o coeficiente médio dos reservatórios estudados.

A partir do modelo apresentado na Equação 3 com o coeficiente de decaimento do fósforo proposto por Toné & Lima Neto (2018), estimou-se a carga de fósforo afluyente aos reservatórios ao longo do período de estudo.

Observa-se na Figura 3 uma elevada variabilidade da carga de fósforo afluyente modelada para os reservatórios ao longo do tempo. Tal aspecto é esperado principalmente devido a variabilidade das diversas variáveis envolvidas, sendo uma das mais notáveis o volume do reservatório, que diminuiu significativamente devido à seca durante o período de estudo. Ademais, o reservatório Castanhão apresentou um aporte de carga superior ao Orós para o período analisado. Em comparação a carga média aportada estimada pela COGERH, o Orós apresentou uma diferença média percentual de 76% e Coeficiente de variação 0.28. Já o Castanhão apresentou diferença média percentual 63% e coeficiente de variação 0.46. Obteve-se também que, para ambos os reservatórios, a carga modelada apresentou valores inferiores ao valor médio estimado pela COGERH para todo o período estudado.

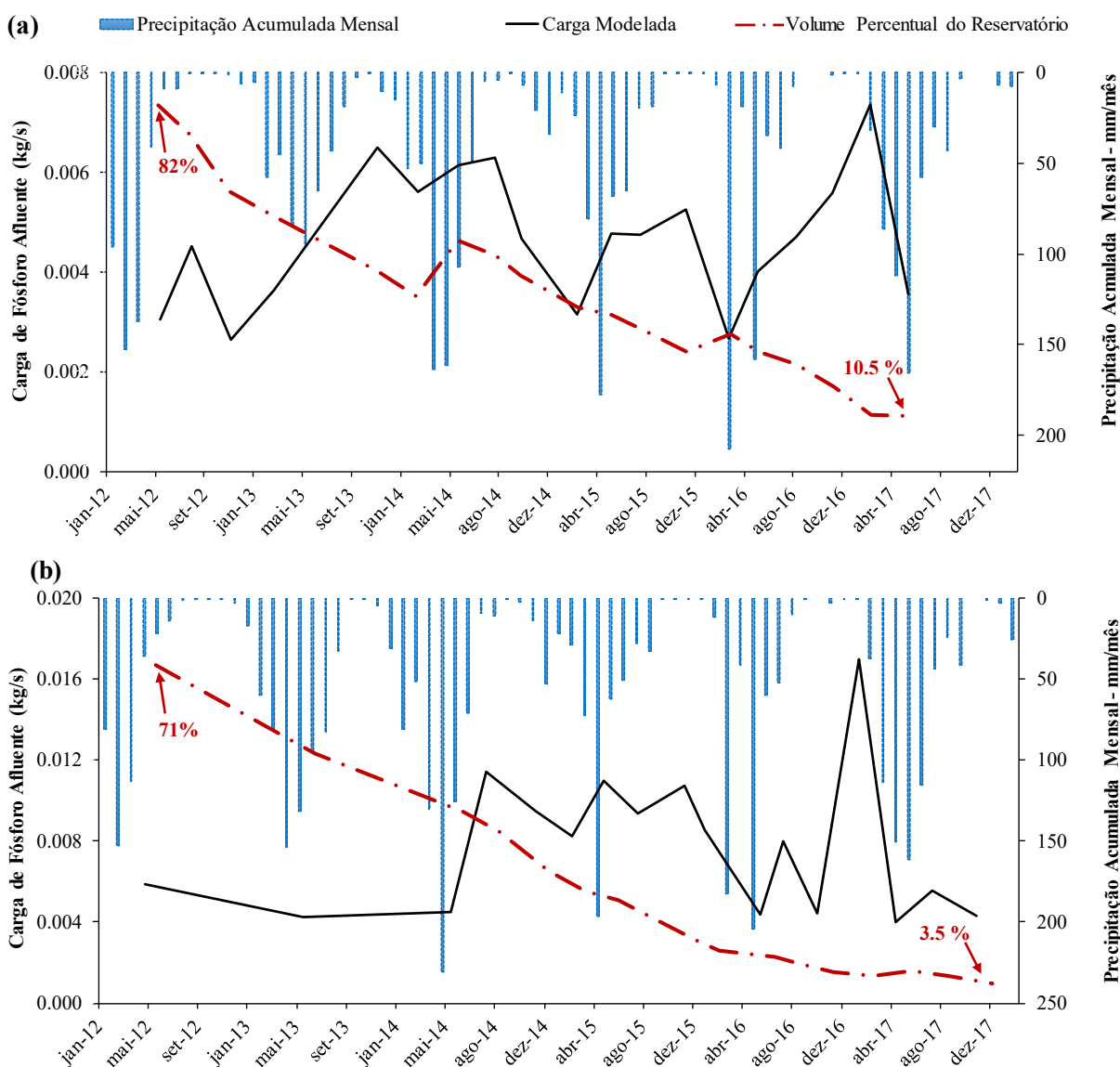


Figura 3. Carga afluente de fósforo total modelada para os reservatórios (a) Orós e (b) Castanhão para o período de 2012 a 2017 junto à precipitação mensal durante o mesmo período. O volume percentual do Orós variou de 82% em janeiro de 2012 a 10.5% em maio de 2017 e do Castanhão de 71% a 3.5% nos referidos meses.

Uma vez determinadas as cargas e vazões afluentes aos reservatórios, pôde-se estimar a concentração de fósforo total afluente e ajustar um modelo simplificado entre vazão e concentração para cada reservatório, como mostra a Figura 4. Verifica-se que a concentração de P afluente apresenta um regime de diluição simples nos modelos propostos para ambos os reservatórios com a diminuição da concentração à medida que a vazão aumenta.

Bowes *et al.*, (2008) relata que rios onde aportam predominantemente cargas pontuais tendem a ter os maiores valores de concentração nos períodos de baixas vazões e, reciprocamente, a concentração diminuirá para elevadas vazões. Para o reservatório Orós, a seção de controle do rio Jaguaribe estudada encontra-se na cidade de Iguatu – CE, uma das mais populosas e desenvolvidas do estado, porém, com baixíssima cobertura de saneamento básico, apenas 1.8% dos domicílios (IPECE – Anuário Estatístico do Ceará, 2008), podendo-se então explorar que tal aspecto já representa significativamente a carga afluyente pontual aportada ao rio. Jarvie *et al.*, (2006) apontam que as cargas pontuais provenientes de efluentes domésticos ou industriais representam um risco maior para a eutrofização de rios do que cargas difusas da agricultura, ainda que na zona rural. Deve-se ressaltar então que em apenas cinco cidades da bacia do reservatório Orós há culturas mais expressivas de milho, feijão e arroz as quais contribuem percentualmente com uma carga difusa estimada de fósforo total de apenas 10.6% enquanto as cargas pontuais estimadas provenientes do esgotamento e piscicultura equivalem a aproximadamente 72.3% (Ceará, 2011).

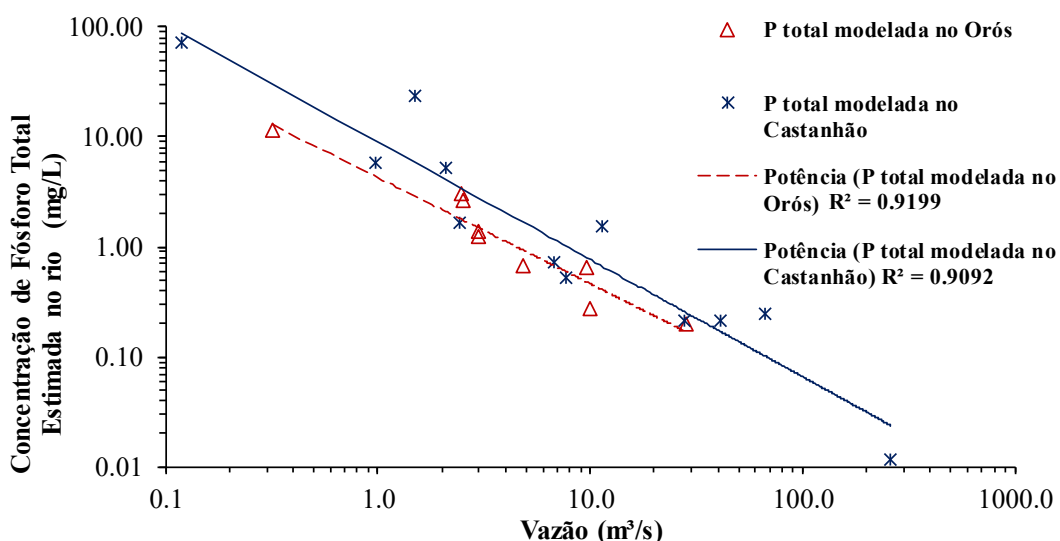


Figura 4. Relação entre vazão afluyente e Concentração de Fósforo Total afluyente modelada discretamente para seção de entrada dos reservatórios analisados.

As Equações (5) e (6) apresentam a curva de relação de potência entre as variáveis apresentadas ajustadas para o Orós e Castanhão, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4. O ajuste priorizou o elevado coeficiente de correlação bem como a coerência em relação ao fenômeno físico. Para ambos os reservatórios as análises de variância apresentaram $P < 0.0001$ para um nível de significância de 5%.

$$PT = 4.262 Q_e^{-0,964}$$

Equação (5)

$$PT = 8.884 Q_e^{-1,065}$$

Equação (6)

Onde PT é a concentração de fósforo total na água afluyente ao reservatório e Q_e é a vazão afluyente.

Avaliou-se também a qualidade da água quanto ao parâmetro fósforo total de acordo com o atendimento aos valores de referência da Resolução CONAMA 357/2005 considerando a classe II de enquadramento, classe assumida para reservatórios ainda não enquadrados. A Figura 5 apresenta a disposição dos dados da concentração de fósforo total dos corpos hídricos estudados, nos reservatórios e respectivas seções de entrada. Observa-se que os valores apresentados na Figura 6 encontram-se, em geral, superiores ao valor limite de referência da resolução de 0.1 mg/L para rio, nas seções de entrada, e de 0.03 mg/L para reservatório. Esse aspecto indica que os reservatórios estão mais susceptíveis ao processo de eutrofização visto que o fósforo é um dos principais nutrientes limitantes para esse fenômeno (Sternier 2008; Filstrup *et al.*, 2014; Wiegand *et al.*, 2016). A situação de seca prolongada a que estiveram submetidos durante o período, com a conseqüente alteração da qualidade de suas águas devido à drástica variação volumétrica, aliada ao aporte excessivo de carga advindo dos usos da bacia e do reservatório, contribuem diretamente para esse cenário (Lopes *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2016; Lacerda *et al.*, 2018).

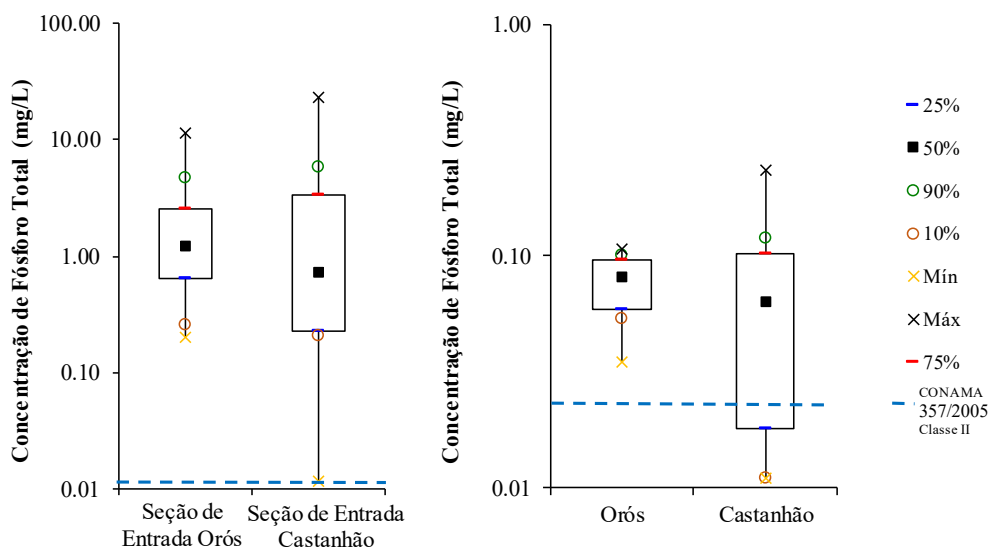


Figura 5. Estatísticas da concentração de fósforo total: (a) Modelada na seção de entrada dos reservatórios e (b) Medida junto ao barramento dos reservatórios.

Obteve-se também as concentrações de referência C_{10} , concentração de fósforo total superada em 10% do tempo, e C_{90} , concentração de fósforo total superada em 90%, para os reservatórios, apresentadas na Figura 6. Para o Orós, a concentração superada em 90% do tempo já é maior que a concentração máxima admissível pela Resolução CONAMA 357/2005 para a classe II e, nas duas seções estudadas, a concentração superada em 10% do tempo de estudo supera o valor característico para a concentração de fósforo total no esgoto de 4.0 mg/L (Sperling, 2007).

Avaliando-se ainda o aspecto de que os reservatórios estudados se encontram em sequência, as Figuras 5 e a Figura 6, posteriormente apresentada, indicam que as concentrações do Castanhão são consistentemente inferiores às do Orós. Conforme ressaltado na descrição das características de uso e ocupação do solo das bacias dos dois reservatórios, a bacia do Médio Jaguaribe, que pode produzir um acréscimo de contribuição para o Castanhão, não possui expressivo uso do solo voltado para a agricultura e pecuária como a bacia do reservatório Orós, logo, pode-se considerar esse relevante aspecto explicativo para a diminuição da concentração de fósforo total e a melhoria na qualidade da água observada no Castanhão bem como ao fato que os reservatórios encontram-se em sequência, condição esta que pode contribuir para melhoria da qualidade da água ao longo da série de reservatórios (Tundisi, 1981; Cook *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2016).

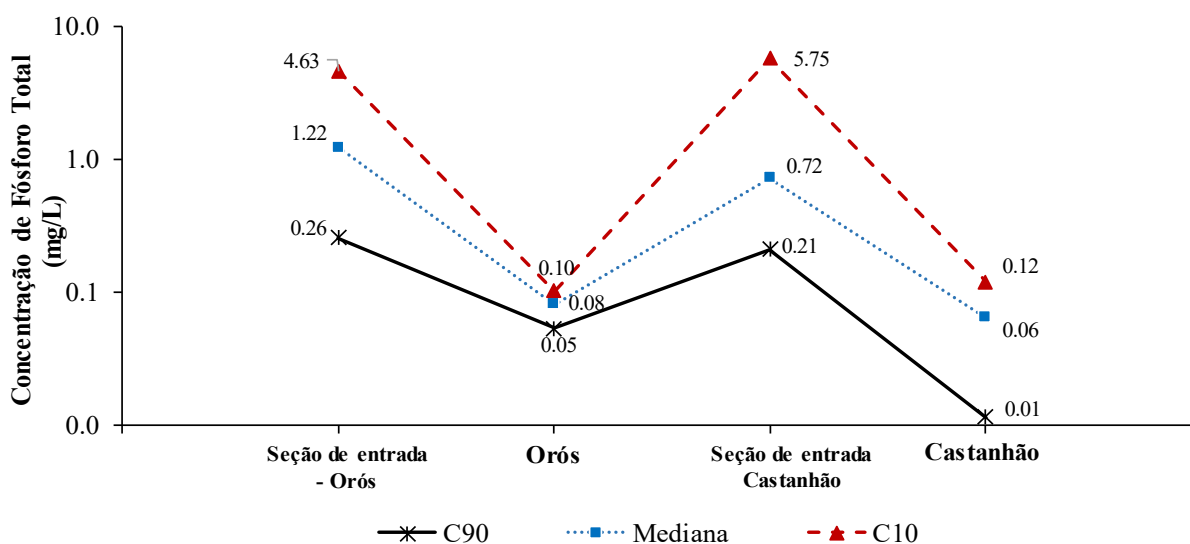


Figura 6. Concentrações de fósforo total nos corpos hídricos superadas em 10% e em 90% do tempo estudado e a concentração mediana.

Por fim, a Figura 7 apresenta a avaliação de cenários de diferentes concentrações de P aportadas e o impacto à concentração de P na coluna de água dos reservatórios. Através de modelagem em regime permanente, obteve-se a concentração de fósforo total nos reservatórios considerando-se a vazão afluente com concentrações iguais aos limites de referência em ambientes lóticos para classes II e III, respectivamente, ($P=0.10$ e $P=0.15$ mg/L). A classe I possui limite igual a classe II e a classe IV não limita P, sendo, portanto, não simuladas.

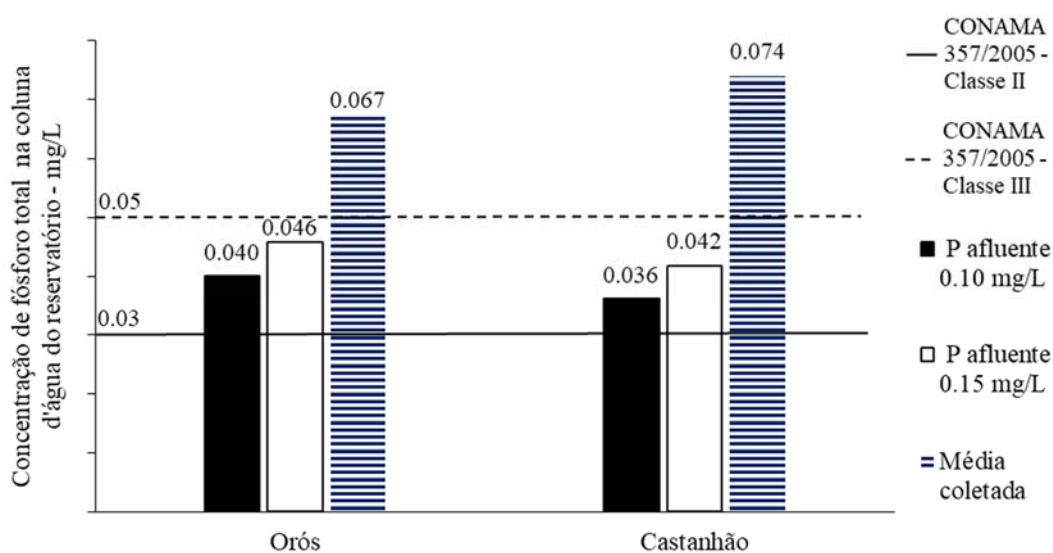


Figura 7. Concentrações de fósforo total na coluna d'água dos reservatórios para diferentes concentrações de P na vazão afluente em comparação a concentração P média medida nos reservatórios.

Obtiveram-se as concentrações na coluna d'água do Orós de 0.04 e 0.046 mg/L e do Castanhão de 0.036 e 0.074 mg/L, com a vazão afluente respeitando as classes II e III, respectivamente. Verifica-se então que os reservatórios não atingem o valor limite da concentração de P total de 0.03 mg/L para a classe II, ainda que seja considerada a concentração afluente dentro dos limites dessa classe para ambientes lóticos. Entretanto, ambos os reservatórios conseguem alcançar valores para a concentração de P total na coluna d'água inferiores a 0.05 mg/L quando a concentração P afluente é de 0.15 mg/L, ressaltando então que em um cenário onde a vazão afluente do rio se enquadrasse na classe III quanto ao parâmetro P total ambos os reservatórios também se enquadrariam.

Conclusões

O presente trabalho avaliou o comportamento da concentração de fósforo total para diferentes níveis de vazão em dois reservatórios rurais estratégicos do semiárido cearense, Orós e Castanhão, em cascata. Para cada reservatório desenvolveu-se um modelo simplificado para a previsão da concentração de fósforo total em função da vazão aportada. A partir das equações propostas observou-se que ambos apresentaram regime de diluição simples, diminuição da concentração de PT à medida que a vazão aumenta. Os resultados mostraram ainda um comportamento esperado para a concentração de PT para reservatórios em série, havendo uma diminuição progressiva na concentração.

Obteve-se também as concentrações de fósforo total superadas em 10% e 90% do tempo nas vazões afluentes e na coluna d'água dos reservatórios com C_{10} e C_{90} no Orós de 0.01 e 0.05 mg/L e no Castanhão de 0.11 e 0.01 mg/L. Verificou-se ainda que os reservatórios estudados estão em desacordo com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 (classe II) com relação ao fósforo total (PT > 0.03 mg/L) em 89.5% e 82.4% do tempo analisado para Orós e Castanhão, respectivamente. Por fim, a análise de cenários de melhoria da qualidade da água afluente quanto ao parâmetro fósforo total indicaram que os reservatórios não atingem a concentração de PT para classe II ainda que a vazão afluente estivesse atendendo à classe II para ambientes lóticos.

Referências bibliográficas

- APHA, American Public Health association (2005). *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater*. 21st Ed. Washington: APHA. 1083p.
- Araújo, G. M., Lima Neto, I. E. (2019). Phosphorus dynamics in a highly polluted urban drainage channel-shallow reservoir system in the Brazilian semiarid. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **91**(3): 1678-2690. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201920180441>
- Bowes, M. J., Jim, T. S., Jarvie, H. P., Neal, C. (2008) Modelling of phosphorus inputs to rivers from diffuse and point sources, *Science of the total environment*, **395**(2-3), 125-138. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.054>
- Brasil (2018) Instituto Nacional de Meteorologia, INMET. Normais climatológicas. Acesso em 01 de março de 2018, disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>
- Brasil (2005) Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 – In: Resoluções, 2005. Acesso em 10 de novembro de 2017, disponível em: <http://www.mma.gov.br>
- Carney, H.J., Binford, M.W., Marin, R.R., Goldman, C.R. (1993) Nitrogen and phosphorus dynamics and retention in ecotones of Lake Titicaca, Bolivia/Peru. *Hydrobiologia*, **82**(251), 39-47. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-1602-2_6
- Ceará, (2011) *Inventário Ambiental do Açude Orós*, Secretaria de Gestão de Recursos Hídricos, SRH. Governo do Estado do Ceará Acesso em 05 de fevereiro de 2017, disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/arquivos/inventarios/ORÓS.pdf>
- Ceará, (2009) *Caderno regional da sub-bacia do Médio Jaguaribe*, Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). Coleção Cadernos Regionais do Pacto das Águas, v. 5. Fortaleza: INESP, 119 pp.

- Ceará (2008) *Anuário estatístico do Ceará, Fortaleza*. Governo do Estado do Ceará, Instituto de Pesquisa Estratégica do Ceará, IPECE. Acesso em 02 de fevereiro de 2017, disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/anuario-estatistico-do-ceara/>
- COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (2017) Monitoramento Quantitativo e Qualitativo dos Recursos Hídricos. Acesso em 02 de setembro de 2017, disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/reservatorios/qualidade/eutrofizacao>
- Cook, P. L. M., Aldridge, K. T., Lamontagne, S., Brookes, J.D. (2010) Retention of nitrogen, phosphorus and silicon in a large semi-arid riverine lake system, *Biogeochemistry*, **99**(1-3), 49-63. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10533-009-9389-6>
- De Farias Mesquita, J. B., Lima Neto, I. E., Raabe, A., De Araújo, J. C. (2020) The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake. *Journal of Hydrology*, **590**, 125456. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125456>
- Edmondson, W. T., Vollenweider, R. A. (1968) Water management research. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. Organization for Economic Co-operation and Development. *Limnology and Oceanography*, **15**(1), 169-170. doi: <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1970.15.1.0169>
- Filstrup, C. T., Wagner, T., Soranno, P. A., Stanley, E. H., Stow, C. A., Webster, K. E., Downing, J. A. (2014) Regional variability among nonlinear chlorophyll phosphorus relationships in lakes. *Limnology and Oceanography*, **59**(5), 1691–1703. doi: <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2014.59.5.1691>
- FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia (2018) *Calendário de Chuvas do estado de Ceará*. Acesso em 31 de maio de 2018, disponível em: <http://www.funceme.br/app/calendario/>
- Holas, J., Holas, M., Chour, V. (1999) Pollution by phosphorus and nitrogen in water streams feeding the Zelivka drinking water reservoir, *Water Science and Technology*, **39**(12), 207-214. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00337-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00337-6)
- Jarvie, H. P., Neal, C., Withers, P. J. A. (2006) Sewage-effluent phosphorus: A greater risk to river eutrophication than agricultural phosphorus?, *Science of The Total Environment*, **360**(1-3), 246-253. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.08.038>
- Johnes, P. J. (1996) Evaluation and management of the coefficient land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach, *Journal of Hydrology*, **183**(3-4), 323-349. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02951-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(95)02951-6)
- Jorgensen, S. E., Vollenweider, R. A., Vannucci, D., Tundisi, J. G. (2000) Diretrizes para o gerenciamento de lagos. Princípios para o gerenciamento de lagos, ILEC/IIE/UNEP, São Carlos, 200 pp.
- Koski-vahala, J., Hartikainen, H. (2001) Assessment of the risk of phosphorus loading due to resuspended sediment, *Journal of Environmental Quality*, **30**(3), 960-966. doi: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2001.303960x>
- Krug, A. (1993) Drainage history and land use pattern of a Swedish river system - their importance for understanding nitrogen and phosphorus load, *Hydrobiologia*, **251**(1-3), 285-296. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00007188>
- Lacerda, L. D., Santos, J. A., Marins, R. V., Silva, F. A. T. F., (2018) Limnology of the largest multi-use artificial reservoir in NE Brazil: The Castanhão Reservoir, Ceará State, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **90**(21), 2073-2096. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201820180085>
- Lamparelli, M. C. (2004) *Grau de Trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento*. Tese de Doutorado – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 235p.
- Lopes, F. B., Eunice, M. A., Meireles, A. C. M., Becker, H., Batista, A. A. (2014) Assessment of the water quality in a large reservoir in semiarid region of Brazil, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **18**(4), 437-445. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662014000400012>
- Lu, T., Chen, N., Duan, S., Chen, Z., Huang, B. (2016) Hydrological controls on cascade reservoirs regulating phosphorus retention and downriver fluxes, *Environmental Science And Pollution Research*, **23**(23), 24166-24177. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-7397-3>

- Mcdowell, R. W., Sharpley, A. N., Condon, L. M., Haygarth, P. M., Brookes, P. C. (2001) Processes controlling soil phosphorus release to runoff and implications for agricultural management, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **59**(3), 269-284. doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1014419206761>
- Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y. (2018) Global Anthropogenic Phosphorus Loads to Freshwater and Associated Grey Water Footprints and Water Pollution Levels: A High-Resolution Global Study, *Water Resources Research*, **54**(1), 345-358. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/2017wr020448>
- Noges, P., Jarvert, A., Tuvikene, L., Noges, T. (1998) The budgets of nitrogen and phosphorus in a shallow eutrophic Lake Võrtsjarv, Estonia, *Hydrobiologia*, **363**(1), 219-227. doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1003165419934>
- Parry, R. (1998) Agriculture phosphorus and water quality: A U.S. Environmental Protection Agency perspective, *Journal of Environmental Quality*, **27**(2), 258-261. doi: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020003x>
- Pacheco, C. H. A., Lima Neto, I. E. (2017). Effect of Artificial Circulation on the Removal Kinetics of Cyanobacteria in a Hypereutrophic Shallow Lake J Environ Eng 143(12): 06017010, 1-8.
- Rocha, S. M. G., Mesquita, J. B. F.; Lima Neto, I. E. (2019) Análise e modelagem das relações entre nutrientes e fitoplâncton em reservatórios do Ceará. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, **54**, 134-147.
- Santos, J., Marins, R., Aguiar, J., Challar, G., Silva, F. A., Lacerda, L. D. (2016) Hydrochemistry and trophic state change in a large reservoir in the Brazilian northeast region under intense drought conditions, *Journal of Limnology*, **76**(1), 41-51. doi: <http://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1433>
- Schindler, D. W., Hecky, R. E., Findlay, D. L., Stainton, M. P., Parker, B.R., Peterson, M. J., Beaty, K. G., Lyng, M., Kasian, S.E. (2008) Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**(32): 11254–11258. doi: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0805108105>
- Schulz, Ralf (2001) Rainfall-induced sediment and pesticide input from orchards into the Lourens River, Western Cape, South Africa: Importance of a single event, *Water Research*, **35**(8), 1869-1876. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00458-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00458-9)
- Sharpley, A. N., Jarvie, H. P., Buda, A., May, L., Spears, B., Kleinman, P. (2013) Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment, *Journal of Environmental Quality*, **42**(5), 1308-1326. doi: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2013.03.0098>
- Sperling, M. V. (2014) *Estudos da modelagem da qualidade da água de rios*, 2a ed, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte, 588 pp.
- Sturner, R. W. (2008) On the phosphorus limitation paradigm for lakes, *International Review of Hydrobiology*, **93**(4-5), 433-445. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/iroh.200811068>
- Toné, A. J. A., Lima Neto, I. E. (2018) Modelagem simplificada do fósforo total em lagos e reservatórios brasileiros. *Revista DAE*, **68**(221), 142-156. doi: <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2020.012>
- Tundisi, J.G (1981) Typology of reservoirs in Southern Brazil, *Sil Proceedings, 1922-2010*, **21**(2), 1031–1039. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/03680770.1980.11897128>
- Sperling, M. V. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*, Iwa Publishing, New York, 292 pp.
- Wiegand, M. C.; Piedra, J. I. G.; Araújo, J. C. (2016) Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **21**(2), 415-424. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016139527>
- Wiegand, M. C., Nascimento, A. T. P., Costa, A. C., Lima Neto, I. E. (2020) Avaliação de nutriente limitante da produção algal em reservatórios do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (IMPRESSA)*, **55**, 456-478. doi: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200681>
- Wiegand, M. C., Nascimento, A. T. O., Costa, a. C., Lima Neto, I. E. (2021) Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability. *Journal of Arid Environments*, **184**, 104321. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104321>
- Young, W. J., Marston, F. M., Davis, R. J., (1996) Nutrient exports and land use in Australian catchments, *Journal of Environmental Management*, **47**(2), 165-183. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/jema.1996.0043>