

Modelagem simplificada do fósforo total em lagos e reservatórios brasileiros

• **Data de entrada:**
30/04/2018

• **Data de aprovação:**
27/06/2018


Simple modelling of total phosphorus in brazilian lakes and reservoirs

Arthur J. A. Toné¹; Iran E. Lima Neto^{2*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.012>

ORCID ID

Toné A.J.A.  <https://orcid.org/0000-0001-9691-6563>

Lima Neto, I. E.  <https://orcid.org/0000-0001-8612-5848>

Resumo

O fósforo é considerado o principal fator responsável pela eutrofização de lagos e reservatórios. No presente estudo, utilizou-se um modelo transiente de mistura completa para analisar a dinâmica do fósforo em 40 lagos e reservatórios localizados nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Os resultados confirmaram a dependência do coeficiente de decaimento de fósforo com o inverso da raiz quadrada do tempo de residência hidráulica. No entanto, em virtude da elevada temperatura da água dos lagos e reservatórios do Nordeste, esse coeficiente assumiu valores cerca de duas vezes superiores àqueles observados em regiões de clima tropical. Por outro lado, devido à alta variabilidade de temperatura dos lagos e reservatórios do Sudeste, o coeficiente oscilou entre valores extremos observados em regiões de clima temperado e semiárido. Em virtude disso, propôs-se uma equação geral para calcular o coeficiente de decaimento de fósforo como uma função não apenas do tempo de residência hidráulica, mas também da temperatura da água. Após validação e análise de sensibilidade do modelo proposto, o mesmo foi aplicado a um reservatório hipotético sujeito a variações temporais de volume, vazão, carga e temperatura da água. Espera-se que este modelo simplificado possa auxiliar na gestão de lagos e reservatórios brasileiros.

Palavras-chave: Eutrofização. Temperatura. Qualidade da água.

Abstract

Phosphorus is considered the main factor responsible for eutrophication of lakes and reservoirs. In the present study, a transient complete mixing model was used to analyse phosphorus dynamics in 40 lakes and reservoirs located in the Northeast, Southeast and Central-West regions of Brazil. The results confirmed the dependence of the phosphorus decay coefficient on the inverse of the square root of the hydraulic residence time. However, due to the high-water temperature of the lakes and reservoirs of the Northeast, this coefficient assumed values about two times higher than those observed in regions of tropical climate. On the other hand, due to the high temperature variability of the lakes and reservoirs in the Southeast, the coefficient oscillated between extreme values observed in temperate and semiarid regions. As a result, a general equation was proposed to calculate the phosphorus decay coefficient as a function not only of the hydraulic residence time, but also of the water temperature. After validation and sensitivity analysis of the proposed model, it was applied to a hypothetical reservoir subject to temporal variations of water volume, flow, load and temperature. This simple model will potentially assist in the management of Brazilian lakes and reservoirs.

Keywords: Eutrophication. Temperature. Water quality.

¹ Cogerh - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Fortaleza (CE), Brasil.

² UFC - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza (CE), Brasil.

* **Autor correspondente:** iran@ufc.br.

1 INTRODUÇÃO

O elevado aporte de fósforo tem sido apontado como o principal fator responsável pela eutrofização de corpos hídricos lênticos, tais como lagos e reservatórios. As consequências disso são o aumento significativo nos níveis de toxicidade e nos custos para tratamento da água, além dos graves impactos ambientais (ESTEVES, 1998; TUNDISI, 2003).

Em função das concentrações de fósforo e/ou das manifestações ecológicas verificadas em lagos e reservatórios, esses ambientes podem ser classificados de forma genérica, como oligotrófico, mesotrófico, eutrófico ou hipereutrófico, e para a caracterização do seu estado trófico vários índices são utilizados (CARLSON, 1977; TOLEDO Jr. et al., 1983; SALAS & MARTINO, 1991; LAMPARELLI, 2004; CUNHA et al., 2013). Em pesquisa realizada recentemente utilizando os dados disponibilizados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (Cogerh), Rolim (2016) fez uma primeira adaptação do Índice de Estado Trófico - IET para a região semiárida do Brasil.

No Estado do Ceará, o problema da eutrofização tem sido atribuído a fatores como a erosão in-

tenso, altas cargas poluidoras e baixas profundidades dos lagos e reservatórios (FIGUEIRÊDO et al., 2007; PACHECO & LIMA NETO, 2017). A Fig. 1 mostra um levantamento realizado recentemente pela Cogerh, em que mais de 3/4 dos 155 reservatórios monitorados por essa companhia já apresentam estado eutrófico ou hipereutrófico. Avalia-se que a eutrofização também atinja uma parcela significativa de reservatórios menores (não monitorados), os quais apresentam em geral baixas profundidades e condições precárias de proteção ambiental, sendo, portanto, mais suscetíveis ao problema. Note que, somente no Ceará, estima-se um número total de aproximadamente 30.000 reservatórios (CAMPOS et al., 2016). Logo, dada a importância desses mananciais para o abastecimento da população do Nordeste brasileiro, várias pesquisas têm sido conduzidas recentemente com o intuito de avaliar a dinâmica de fósforo em reservatórios (BEZERRA et al., 2014; VIDAL & CAPELO NETO, 2014; BARBOSA & CIRILO, 2015; ARAÚJO et al., 2016; PACHECO et al., 2016; LIMA et al., 2018). No entanto, estudos envolvendo modelagem do fósforo nesses reservatórios ainda são escassos (LIMA, 2016; ARAÚJO et al., 2019).

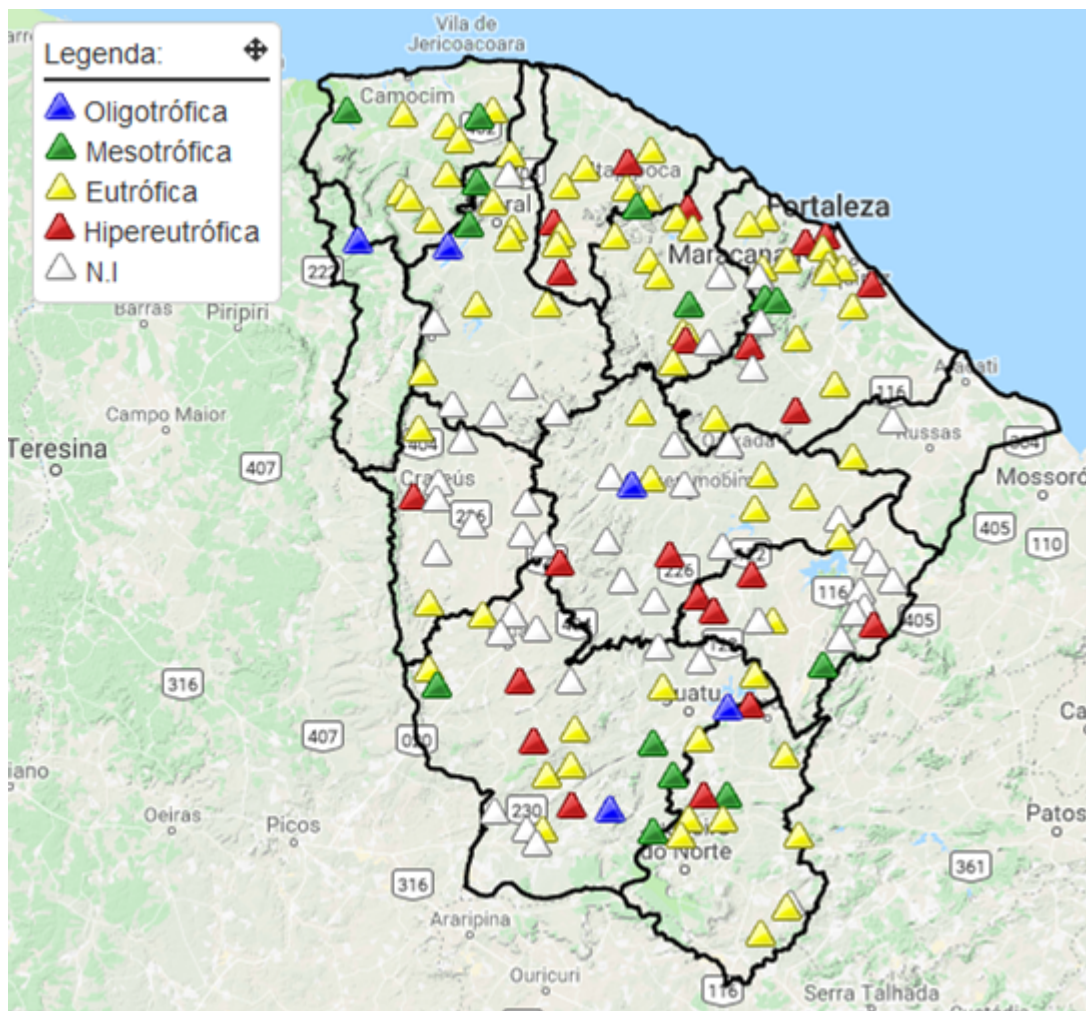


Figura 1. Estado trófico dos reservatórios do Estado do Ceará (Cogerh, 2018).

A modelagem matemática da qualidade da água em lagos e reservatórios remonta à década de 1960, quando surgiu o primeiro modelo de mistura completa (ou zero dimensional) para previsão da concentração de fósforo nesses corpos hídricos (VOLLENWEIDER, 1968). Posteriormente, inúmeros estudos de simulação matemática foram desenvolvidos (CHAPRA, 1997). Contudo, a utilização desses modelos, restringiu-se, principalmente, a lagos de regiões temperadas. Nas décadas de 1980 e 1990, porém, algumas pesquisas visaram à adaptação a corpos hídricos tropicais, como as de Castagnino (1982) e Salas e Martino (1991). No Brasil, o modelo de Salas e Martino (1991) tem sido utilizado frequente-

mente para avaliação da dinâmica do fósforo em lagos e reservatórios (VON SPERLING, 1996), inclusive em regiões semiáridas (COGERH, 2011). Porém tal modelo desconsidera o efeito da variação da temperatura no decaimento do fósforo, podendo levar a erros significativos, uma vez que os mananciais superficiais brasileiros apresentam temperaturas que podem variar entre aproximadamente 10 e 35°C, dependendo da sua localização e/ou das condições de tempo (ANGELOCCI & VILLA NOVA, 1995; MEIRELES et al., 2007; APRILE & DARWICH, 2009; FERREIRA & CUNHA, 2013; BARBOSA et al., 2015; SOUZA et al., 2015). Em princípio, isso teria um impacto direto não apenas na viscosidade da água, afetando

do o processo de sedimentação do fósforo, mas também nas taxas de consumo desse nutriente pelas algas, conforme relatado por Castagnino (1982). No outro extremo de complexidade, encontram-se os modelos multidimensionais (1D, 2D ou 3D), como o CE-QUAL-W2, DELFT3D, DYRESM-WQ, MIKE11, RMA-11, WASP5 e CAE-DYM, os quais incorporam outros parâmetros de qualidade da água além do fósforo e da temperatura (KUO & YANG, 2002; SILVA, 2006).

Nesse contexto, o objetivo do presente estudo foi analisar os dados hidrológicos e de qualidade da água disponíveis para 40 lagos e reservatórios brasileiros, visando propor uma metodologia simples baseada no modelo de mistura completa para previsão da dinâmica do fósforo nesses corpos hídricos, levando em conta a variabilidade de temperatura da água entre as diferentes regiões do país e estações do ano. Espera-se que a ferramenta proposta possa auxiliar na gestão dos recursos hídricos brasileiros, sobretudo em sistemas que envolvam múltiplos lagos e reservatórios.

2 METODOLOGIA

A primeira fase do trabalho consistiu no levantamento de dados e informações referentes à morfologia, hidrologia e qualidade da água de lagos e reservatórios brasileiros. Em função da disponibilidade e consistência desses dados/informações, o universo da amostra se restringiu a 26 lagos e reservatórios localizados nas regiões Sudeste e Centro-Oeste (SALAS & MARTINO, 1991) e 14 na região Nordeste (GUNKEL et al., 2003; MESQUITA, 2009; AZEVEDO, 2012; OLIVEIRA, 2012; SILVA JÚNIOR, 2013; BEZERRA et al., 2014; LIMA & SEVERI, 2014; VIDAL & CAPELO NETO, 2014; LIMA, 2016; ARAÚJO et al., 2019). Cabe salientar que informações complementares, principalmente sobre a morfologia e hidrologia dos lagos e reservatórios,

foram obtidas dos seguintes órgãos: Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – Cogerh, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – Funceme, Departamento Nacional de Obras contra Secas – DNOCS e Companhia Hidrelétrica do São Francisco – CHESF. A seguir, apresenta-se uma lista dos dados que foram levantados para cada lago/reservatório para pelo menos dois períodos de tempo distintos:

- Volume do lago/reservatório (V);
- Vazão de saída (Q);
- Carga de fósforo afluyente (W);
- Concentração de fósforo na água (P);
- Temperatura da água (T), somente disponível para alguns reservatórios.

De posse dos dados de V, Q, W e P, pode-se utilizar o modelo proposto por Vollenweider (1968), que descreve um balanço de massa em regime de mistura completa, em que a concentração de fósforo ao longo do tempo é dada pela Eq. (1) e a sua respectiva solução analítica – Eq. 2:

$$V \frac{dP}{dt} = W - QP - kVP \quad (1)$$

$$P = P_o e^{-\lambda t} + \frac{W}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

em que: $\lambda = k + 1/\tau$, sendo τ = tempo de residência hidráulica (s), definido por $\tau = V/Q$, k – coeficiente de decaimento do fósforo (s^{-1}); P – 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 lago ou reservatório (m^3); W – carga de fósforo afluyente (kg/s); e Q – vazão de saída do reservatório (m^3/s).

O modelo descrito pela Eq. 2 também foi utilizado por Chapra (1997) para previsão da dinâmica do fósforo em diversos lagos temperados. Esse modelo é particularmente interessante para os reservatórios da região Nordeste do Brasil, uma vez que incorpora a possibilidade de variação dos parâmetros V, Q, W e P ao longo do tempo, condição bastante característica do semiárido. Por outro lado, devido às menores variabilidades temporais dos parâmetros supracitados (em contraste à maior variabilidade de T) em lagos e reservatórios tropicais em geral, normalmente despreza-se o termo transiente da Eq. 2 para avaliar as concentrações (ou cargas) de fósforo, como realizado por Salas e Martino (1991) para corpos hídricos lênticos das regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

Para os lagos e reservatórios localizados na região Nordeste do Brasil, os valores do coeficiente k foram ajustados por meio da minimização dos desvios entre medida e modelagem da concentração de fósforo entre diferentes períodos, conforme mostrado na Tabela 1. Para os lagos e reservatórios localizados nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, utilizou-se o banco de dados fornecido por Salas e Martino (1991).

Os valores de k obtidos para os 40 lagos/reservatórios brasileiros selecionados foram comparados com aqueles estimados por meio das equações a seguir, as quais foram propostas por Vollenweider (1968) e Salas e Martino (1991) para regiões de clima temperado e tropical, respectivamente:

$$k = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \quad (3)$$

$$k = \frac{2}{\sqrt{\tau}} \quad (4)$$

Após análise dos dados, propôs-se uma equação geral para o coeficiente de decaimento do fós-

foro como uma função do tempo de residência hidráulica e da temperatura da água, com base no estudo de Castagnino (1982):

$$k = f(\tau, T) \quad (5)$$

Em seguida, realizou-se uma análise de sensibilidade do modelo com relação à temperatura da água, conforme valores típicos observados nas diferentes regiões do Brasil.

Por fim, após validação do modelo usando dados disponíveis na literatura para diferentes condições climáticas, aplicou-se o mesmo a um reservatório hipotético sujeito a variações mensais de V, Q, W e P. Avaliou-se ainda o impacto de redução das cargas de fósforo no atendimento à Resolução Conama 357/05.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os dados de volume (V), tempo de residência hidráulica (τ) e coeficiente de decaimento de fósforo ajustados (k) para os 40 lagos e reservatórios localizados em diferentes estados brasileiros.

Seguindo a mesma sistemática dos trabalhos de Vollenweider (1968) e Salas e Martino (1991), que descrevem $k = f(\tau^{-0.5})$ (ver Eq. 3 e 4), a Fig. 2 mostra os valores de k obtidos para os 40 lagos/reservatórios brasileiros em função dos seus respectivos tempos de residência hidráulica τ . Conforme esperado, observa-se uma tendência geral de decaimento de k em relação a τ . No entanto, os valores obtidos para a região Nordeste são consistentemente superiores aos estimados pela Eq. 4 de Salas e Martino (1991), sendo estes mais bem descritos por meio da seguinte relação:

$$k = \frac{4}{\sqrt{\tau}} \quad (6)$$

Isso sugere que os lagos e reservatórios do semiárido apresentam um coeficiente de decaimento de fósforo mais elevado devido às suas maiores temperaturas da água ($T \cong 28^{\circ}\text{C}$) em comparação com aquelas esperadas em lagos tropicais em geral ($T \cong 20^{\circ}\text{C}$). Esse efeito da temperatura entre corpos hídricos localizados em regiões temperadas ($T \cong 10^{\circ}\text{C}$) e tropicais ($T \cong 20^{\circ}\text{C}$) já havia sido identificado por Castagnino (1982), que atribuiu o aumento de k em função de T a um aumento combinado da viscosidade da água (que influencia na sedimentação do fósforo) e da taxa de consumo de fósforo pelas algas. Por outro lado, verifica-se na Fig. 2 uma elevada dispersão para os dados de k referentes aos lagos e reservatórios localizados na região Sudeste, com os valores ora sendo melhores representa-

dos pela Eq. 3 de Vollenweider (1968) para o clima temperado, ora pela Eq. 4 de Salas e Martino (1991) para o clima tropical, ora pela Eq. 6 obtida no presente estudo para o clima semiárido brasileiro. Isso pode ser atribuído à variação considerável de temperatura ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) observada ao longo do ano em lagos e reservatórios do Sudeste (ver ANGELOCCI & VILLA NOVA, 1995; FERREIRA & CUNHA, 2013; SOUZA et al., 2015), em contraste à variação relativamente pequena ($\pm 4^{\circ}\text{C}$) observada nas regiões Nordeste e Centro-Oeste (MEIRELES et al., 2007; BARBOSA et al., 2015; ARAÚJO et al., 2019). Portanto, pode-se afirmar que o uso da Eq. 4 de Salas e Martino (1991) para prever a dinâmica do fósforo em lagos e reservatórios brasileiros, como normalmente realizado, pode incorrer em erros significativos.

Tabela 1. Dados de volume (V), tempo de residência hidráulica (τ) e coeficiente de decaimento de fósforo ajustados (k) para os 40 lagos e reservatórios brasileiros. Os números entre parênteses indicam estudos realizados em diferentes períodos.

Estado	Lago / Reservatório	V (hm^3)	τ (ano)	k (ano^{-1})	Referência
Bahia	Sobradinho	34100,0	0,59	9,05	Lima e Severi (2014)
Brasília	Descoberto	102,8	0,28	2,30	Salas e Martino (1991)
	Paranoá	564,9	0,73	3,80	Salas e Martino (1991)
Ceará	Acarape do Meio	29,6	1,85	2,97	Lima (2016)
	Gavião	33,3	0,12	12,35	Vidal e Capelo Neto (2014)
	Santo Anastácio	0,3	0,03	19,31	Araújo et al. (2019)
Paraíba	Camalaú	48,1	1,92	2,23	Azevedo (2012)
	Epitácio Pessoa	411,7	1,17	4,97	Silva Júnior (2013)
Pernambuco	Tapacurá	94,2	0,96	5,35	Gunkel et al. (2003)
Rio de Janeiro	Funil (1)	875,5	0,15	3,30	Salas e Martino (1991)
	Funil (2)	875,5	0,13	9,40	Salas e Martino (1991)
	Funil (3)	699,3	0,08	9,00	Salas e Martino (1991)
	Lajes	353,6	0,76	2,00	Salas e Martino (1991)
	Santana	11,9	0,00	110,00	Salas e Martino (1991)
	Vigário	37,7	0,08	48,00	Salas e Martino (1991)
Rio Grande do Norte	Boqueirão de Parelhas	84,8	3,01	2,30	Mesquita (2009)
	Cruzeta	23,6	0,18	9,23	Bezerra et al. (2014)
	Dourado	10,3	0,45	5,54	Oliveira (2012)
	Gargalheiras	40,0	0,61	4,09	Bezerra et al. (2014)
	Itans	81,8	1,54	2,48	Mesquita (2009)
	Passagem das Traíras	49,7	0,24	20,45	Mesquita (2009)
	Sabugi	60,3	2,43	3,41	Mesquita (2009)

Continua...

Continuação...

Estado	Lago / Reservatório	V (hm ³)	τ (ano)	k (ano ⁻¹)	Referência
São Paulo	Americana (1)	105,8	0,05	29,30	Salas e Martino (1991)
	Americana (2)	99,1	0,08	29,46	Salas e Martino (1991)
	Atibainha	260,0	0,39	1,91	Salas e Martino (1991)
	Barra Bonita (1)	1986,2	0,27	3,41	Salas e Martino (1991)
	Barra Bonita (2)	2392,0	0,07	8,04	Salas e Martino (1991)
	Barra Bonita (3)	2492,4	0,21	3,74	Salas e Martino (1991)
	Barra Bonita (4)	2150,0	0,22	9,19	Salas e Martino (1991)
	Cachoeira	76,0	0,13	4,40	Salas e Martino (1991)
	Guarapiranga (1)	136,2	0,24	1,30	Salas e Martino (1991)
	Guarapiranga (2)	115,6	0,33	4,86	Salas e Martino (1991)
	Itupararanga	163,0	0,66	7,81	Salas e Martino (1991)
	Jaguari	588,0	1,23	4,60	Salas e Martino (1991)
	Paiva Castro (1)	38,2	0,06	15,10	Salas e Martino (1991)
	Paiva Castro (2)	22,1	0,03	8,41	Salas e Martino (1991)
	Paraibuna	4435,2	1,92	1,35	Salas e Martino (1991)
	Ponte Nova (1)	187,8	0,62	0,67	Salas e Martino (1991)
	Ponte Nova (2)	170,2	0,81	1,02	Salas e Martino (1991)
Taiáçupeba	19,4	0,14	1,98	Salas e Martino (1991)	

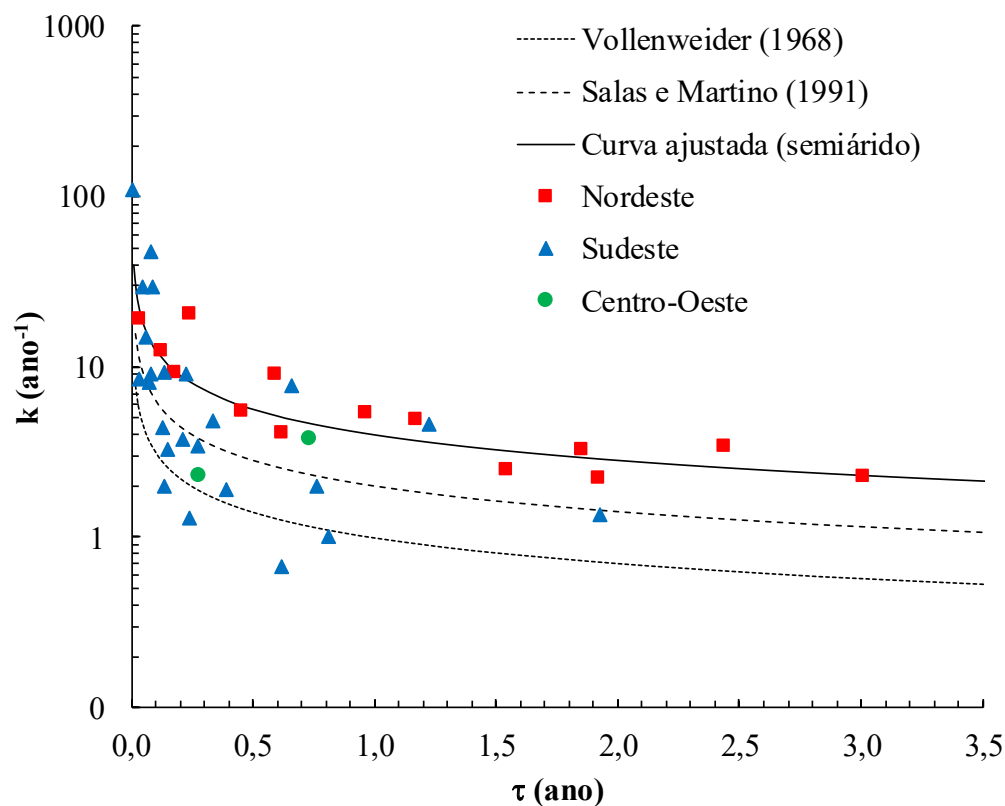


Figura 2. Coeficiente de decaimento de fósforo em função do tempo de residência hidráulica para os 40 lagos e reservatórios brasileiros selecionados no presente estudo, em comparação com os valores previstos pela Eq. 3 de Vollenweider (1968) para o clima temperado, Eq. 4 de Salas e Martino (1991) para o clima tropical e Eq. 6 ajustada para o clima semiárido.

Com o intuito de obter uma equação geral para o coeficiente de decaimento de fósforo que possa ser utilizada para prever a dinâmica desse nutriente nos lagos e reservatórios das diferentes regiões do Brasil, propõe-se a seguinte equação com base no estudo de Castagnino (1982):

$$k = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \frac{\mu_{10}}{\mu_T} \theta^{T-10} \quad (7)$$

Essa equação engloba os efeitos da viscosidade da água (μ) e da taxa de consumo de fósforo (θ) no valor de k , tomando-se como referência uma temperatura $T = 10^\circ\text{C}$. Logo, ajustando-se uma equação para a viscosidade em função da temperatura da água a partir dos dados disponíveis em Kundu et al. (2012), obtém-se $\mu_T = 0,0017e^{-0,025T}$ ($R^2 = 0,998$). Assim, considerando $\mu_{10} = 1,307 \cdot 10^{-3}$ Pa.s e $\theta = 1,066$, obtém-se a seguinte equação geral para descrever o comportamento do coeficiente de decaimento de fósforo k em função da temperatura da água T e do tempo de residência hidráulica τ :

$$k = \frac{0,769e^{0,025T} (1,066)^{T-10}}{\sqrt{\tau}} \quad (8)$$

Essa equação fornece valores para k em regiões tropicais ($T \cong 20^\circ\text{C}$) cerca de 2,5 vezes superiores aos valores para regiões temperadas ($T \cong 10^\circ\text{C}$) e valores para k em regiões semiáridas ($T \cong 28^\circ\text{C}$) cerca de 4,9 vezes superiores aos valores para regiões temperadas ($T \cong 10^\circ\text{C}$). Esse resultado é consistente com as tendências observadas na Fig. 2 a partir das Eq. 3, 4 e 6.

A Fig. 3 mostra uma comparação entre os coeficientes de decaimento de fósforo ajustados na Tabela 1 e os calculados por meio da Eq. 4, de Salas e Martino (1991), e da Eq. 8, proposta neste estudo. Note que, devido à carência de dados de temperatura da água, adotaram-se valores médios de $T = 20, 23$ e 28°C para os lagos e reservatórios localizados nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, respectivamente. Percebe-se para os lagos/reservatórios do Nordeste uma melhoria significativa na aderência dos dados com o uso da Eq. 8, em comparação com a Eq. 4. Por outro lado, os resultados obtidos com as duas equações são semelhantes para o Sudeste e o Centro-Oeste. Porém esperava-se uma menor dispersão dos dados caso a temperatura real de cada lago/reservatório fosse utilizada no cálculo de k , em vez de valores fixos ($T = 20$ e 23°C).

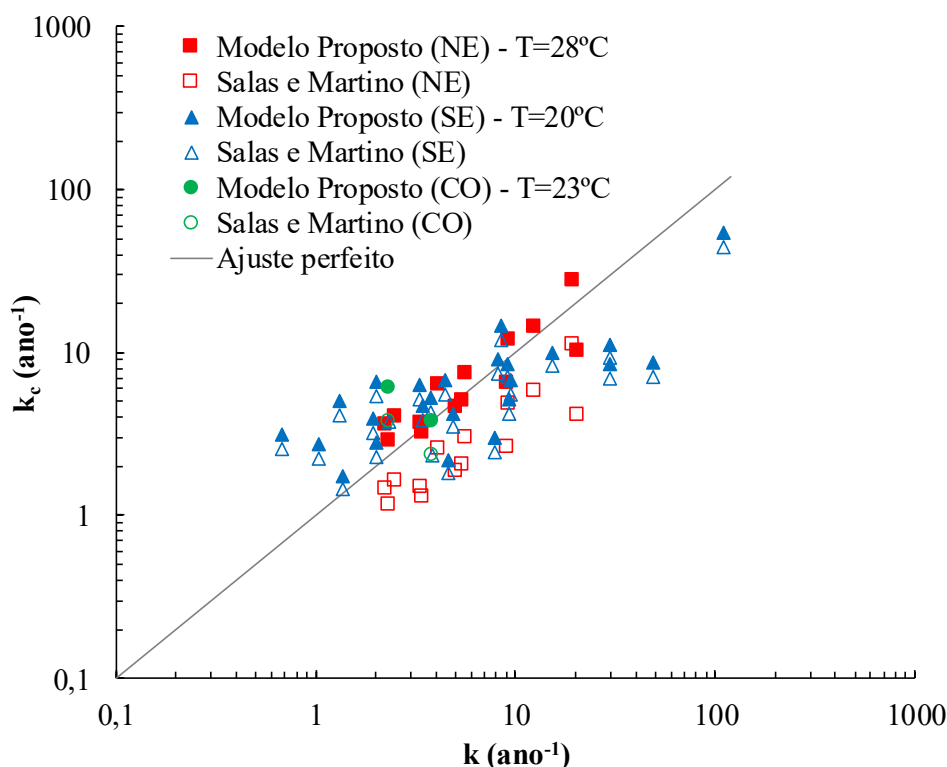


Figura 3. Comparação entre os coeficientes de decaimento de fósforo (k) ajustados na Tabela 1 e os calculados (k_c) por meio da Eq. 4 (Salas e Martino, 1991) e da Eq. 8 (modelo proposto).

A Fig. 4 mostra uma análise de sensibilidade do modelo proposto (Eq. 2 e 8) para investigar o impacto da temperatura da água na dinâmica do fósforo em um lago hipotético com $V = 300 \text{ hm}^3$, $Q = 3.000 \text{ hm}^3/\text{ano}$ e $W = 10 \text{ ton/ano}$. Adotou-se uma variação da temperatura típica de lagos e reservatórios localizados nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, isto é, $15^\circ\text{C} < T < 30^\circ\text{C}$ (ANGELOCCI & VILLA NOVA, 1995; FERREIRA & CUNHA, 2013; SOUZA et al., 2015). Os resultados mostram que, dependendo do valor de T (15 ou 30°C), as concentrações de fósforo P podem levar em torno de 20 ou 120 dias para atingir o limite previsto na Resolução Conama 357/05 para mananciais de classe 2. Observe que a simulação considerando o modelo de Salas e Martino (1991) resultou em valores de P bem próximos daqueles obtidos com

o modelo proposto, considerando $T = 15^\circ\text{C}$. Por outro lado, se a temperatura do lago estiver em torno de $T = 30^\circ\text{C}$, haverá uma aceleração no decaimento do fósforo e o modelo de Salas e Martino (1991) não será mais capaz de prever com precisão a variação temporal desse nutriente. Isso confirma a importância de incorporar o efeito da temperatura nos valores de k , já que T pode afetar substancialmente as respostas do modelo. Vale ressaltar que, embora nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste as variações de T sejam menores, isto é, da ordem de $\pm 4^\circ\text{C}$ (MEIRELES et al., 2007; APRILE & DARWICH, 2009; BARBOSA et al., 2015; ARAÚJO et al., 2019), suas temperaturas médias podem chegar a 30°C , o que também requereria correção do coeficiente k em função da temperatura.

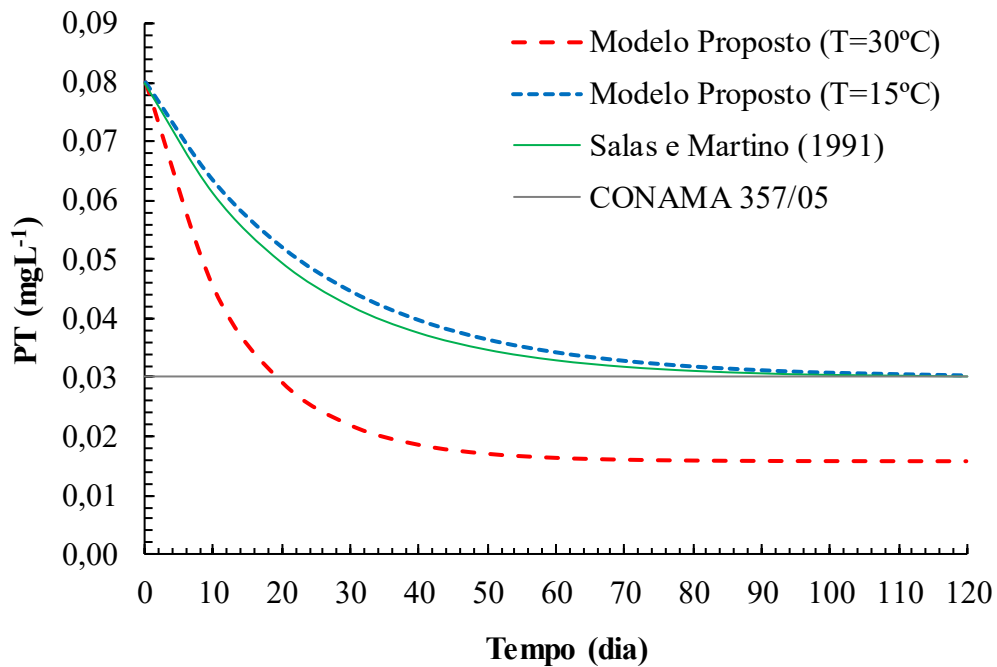


Figura 4. Sensibilidade do modelo proposto com relação à temperatura da água, em comparação com o modelo de Salas e Martino (1991).

Para validação do modelo proposto nesta pesquisa, utilizaram-se os dados disponíveis para reservatórios localizados nas regiões Sul e Nordeste. A Fig. 5 mostra uma excelente aderência do modelo proposto aos dados de campo obtidos por Silva (2006) para o reservatório Fiú no Paraná, resultando em um coeficiente de Nash–Sutcliffe (NSE)

de 0,98 e em um desvio padrão (σ) de 16%. Resultados semelhantes (NSE = 0,98 e σ = 19%) foram obtidos com o coeficiente de Salas e Martino (1991). Pode-se dizer que isto é esperado, uma vez que Salas e Martino (1991) selecionaram lagos e reservatórios com temperaturas médias da ordem de 20°C, como o reservatório Fiú.

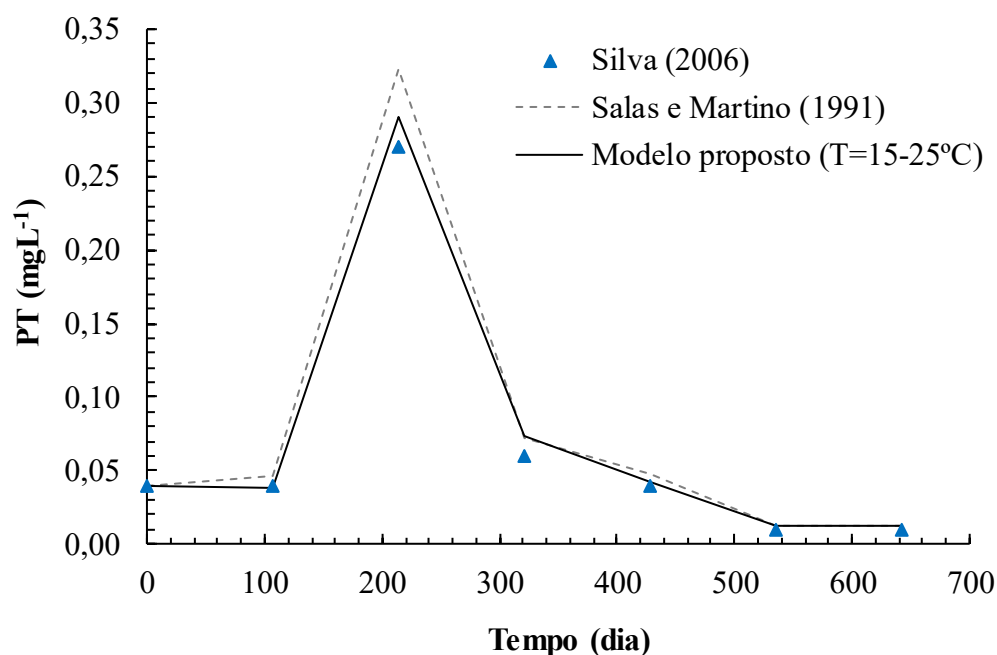


Figura 5. Validação do modelo proposto para o reservatório Fiú localizado na região Sul do Brasil. Simulações com o coeficiente de Salas e Martino (1991) também são mostradas como referência.

A Fig. 6 mostra uma boa aderência do modelo proposto aos dados de campo obtidos por Lima (2006) para o reservatório Acarape do Meio no Ceará, resultando em um coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,68 e em um desvio padrão (σ) de 17%. No entanto, a aderência obtida com o coeficiente de Salas e Martino (1991) foi signifi-

cativamente inferior (NSE = 0,32 e σ = 90%). Isso se explica pelo fato de a temperatura média no referido reservatório ser da ordem de 28°C, isto é, significativamente superior à média de aproximadamente 20°C dos lagos e reservatórios analisados por Salas e Martino (1991).

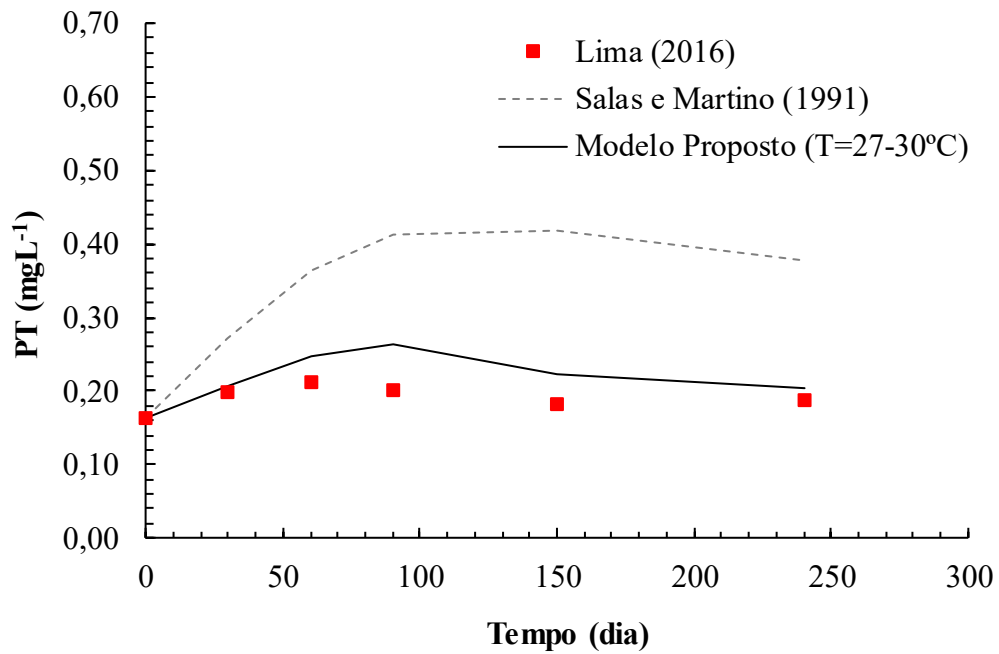


Figura 6. Validação do modelo proposto para o reservatório Acarape do Meio localizado na região Nordeste do Brasil. Simulações com o coeficiente de Salas e Martino (1991) também são mostradas como referência.

Uma vez validado, o modelo proposto pode ser aplicado a casos práticos, como ilustrado a seguir. As Fig. 7(a) e 7(b) mostram valores médios mensais para V, T, Q e W em um reservatório hipotético. Ressalta-se que tais valores podem ser obtidos tanto considerando médias históricas como por meio de modelagem hidrológica. Logo, considerando as Eq. 2 e 8, pode-se simular a variação da concentração de fósforo ao longo do tempo, bem como analisar o impacto de redução

de cargas afluentes em relação ao atendimento à Resolução Conama 357/05, conforme mostrado na Fig. 7(c). Nesse caso, verifica-se que, reduzindo-se a carga afluente pela metade, seria possível atender à legislação supracitada em 2/3 do tempo. Salienta-se que o modelo proposto pode ser utilizado ainda para prever cenários de variação de V, T e Q em função de atividades antrópicas e/ou mudanças climáticas.

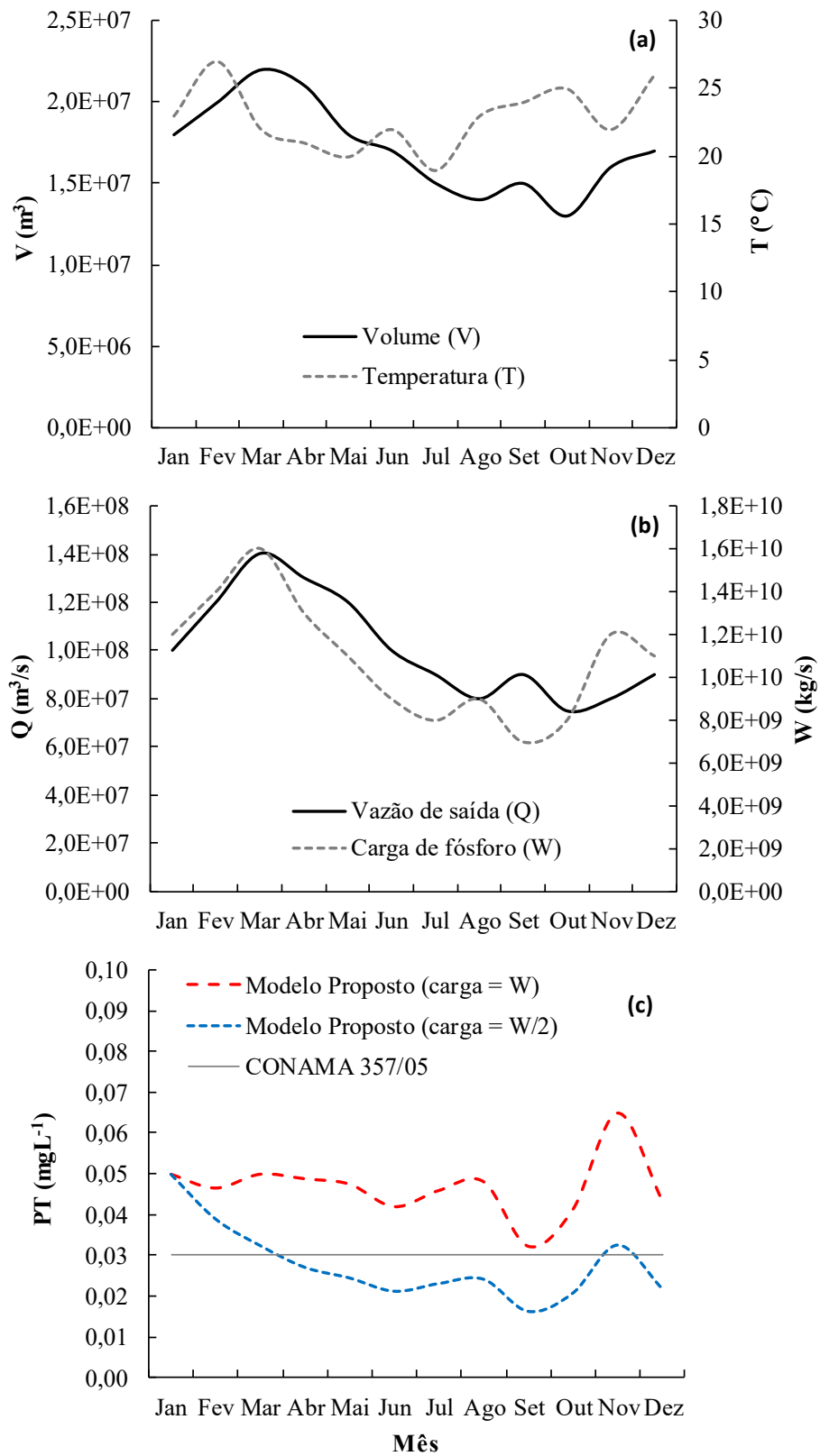


Figura 7. Aplicação do modelo proposto a um reservatório hipotético.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou os dados hidrológicos e de qualidade da água disponíveis para 40 lagos e reservatórios brasileiros, visando propor uma metodologia simples baseada no modelo transiente de mistura completa para análise e previsão da dinâmica do fósforo nesses corpos hídricos lânticos. Os resultados confirmaram a dependência do coeficiente de decaimento de fósforo com o inverso da raiz quadrada do tempo de residência hidráulica, conforme observado anteriormente para lagos e reservatórios localizados em regiões temperadas e tropicais. Contudo, devido à elevada temperatura da água dos lagos e reservatórios do Nordeste brasileiro, o coeficiente de decaimento de fósforo apresentou valores duas vezes superiores àqueles observados em regiões de clima tropical e quatro vezes superiores aos reportados para regiões de clima temperado. Além disso, em virtude da alta variabilidade da temperatura da água dos lagos e reservatórios do Sudeste, o coeficiente de decaimento de fósforo oscilou entre valores extremos observados em regiões de clima temperado e semiárido. Assim, propôs-se uma equação geral para calcular esse coeficiente como uma função do tempo de residência hidráulica e da temperatura da água. Realizou-se uma análise de sensibilidade do modelo proposto que confirmou a necessidade de incorporar a temperatura da água na modelagem do fósforo em corpos hídricos lânticos brasileiros. O modelo proposto foi validado e posteriormente aplicado a um reservatório hipotético, demonstrando-se o seu potencial para prever cenários de variação de volume, vazão, carga e temperatura da água em função de atividades antrópicas e/ou mudanças climáticas.

5 REFERÊNCIAS

- ANGELOCCI, L. R., VILLA NOVA, N. A. Variações da temperatura da água de um pequeno lago artificial ao longo de um ano em Piracicaba – SP. *Sci. Agric.*, 52(3), 431-438. 1995.
- APRILE, F. M., DARWICH, A. J. Regime térmico e a dinâmica do oxigênio em um lago meromítico de águas pretas da região amazônica. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 13(1), 37-43. 2009.
- ARAUJO, G. M., LIMA NETO, I. E., BECKER, H. Estado trófico em reservatório urbano raso - Estudo de caso: Açude Santo Anastácio, Fortaleza (CE). *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 9, 212-228, 2016.
- ARAUJO, G. M., LIMA NETO, I. E., BECKER, H. Phosphorus dynamics in a highly polluted urban drainage channel-shallow reservoir system in the Brazilian semiarid. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(3), <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201920180441>, 2019.
- AZEVEDO, S. B. **Impactos da piscicultura intensiva sobre a qualidade da água de um reservatório no semiárido**. Dissertação (Mestrado). UEPB. 2012.
- BARBOSA, C. C. **Aplicação da modelagem ecológica com foco na dinâmica do fitoplâncton para avaliação da qualidade da água do lago Paranoá – DF**. Dissertação (Mestrado), UNB. 2015.
- BARBOSA, I. B. R., CIRILO, J. A. Contribuição média de fósforo em reservatório de abastecimento de água – Parte 1. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20 (1), 39-46. 2015.
- BEZERRA, A. F. M., BECKER, V., MATTOS, A. Balanço de Massa de Fósforo Total e o Estado Trófico em Reservatórios do Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(2), 67-76. 2014.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005.
- CAMPOS, J. N. B., LIMA NETO, I. E., STUDART, T. M. C., NASCIMENTO, L. S. V. Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88, 1113-1126. 2016.
- CARLSON, R.E. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22 (2): 361-369. 1977.
- CASTAGNINO, W. A. **Investigación de modelos simplificados de eutroficación en lagos tropicales**. Organización Panamericana de la Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Versión Revisada. 1982.

- CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling**, McGraw-Hill. 1997.
- COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS – COGERH **Inventário Ambiental – Açude Castanhão**. <http://www.hidro.ce.gov.br/mi/midia/show/150>. 2011
- COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS – COGERH. **Portal Hidrológico do Ceará – Qualidade da Água**. <http://www.hidro.ce.gov.br/acude/eutrofizacao>. 2018.
- CUNHA, D. G. F., CALIJURI, M. C., LAMPARELLI, M. C. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tr}). **Ecological Engineering**, 60, 126-134. 2013.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. edição, Interciência (Ed.), Rio de Janeiro – RJ, 602 p. 1998.
- FERREIRA, D. M., CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 18(1), 83-93. 2013.
- FIGUEIRÊDO, M. C. B., TEIXEIRA, A. S., ARAÚJO, L. F. P., ROSA, M. F., PAULINO, W. D., MOTA, S., ARAÚJO, J. C. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 12, 399-409. 2007.
- GUNKEL, G., RUETER, K., CASALLAS, J., SOBRAL, M. C. Estudos da limnologia do reservatório de Tapacurá em Pernambuco: Problemas da gestão de reservatórios no semiárido brasileiro. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 1-17. **Anais.**, 2003.
- KUNDU, P. K., COHEN, I. M., DOWLING, D. R. Fluid Mechanics. Academic Press. 2012.
- KUO, J. T., YANG, M. D. Water quality modeling in reservoirs. In: Shen, H.H., Cheng, A.H.D., Wang, K.H., Tang, M.H. (Eds.), **Environmental Fluid Mechanics Theories and Applications**. ASCE Engineering Mechanics Division, 377-420 (Chapter 11). 2002.
- LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. Tese (Doutorado), USP. 2004.
- LIMA, A. E., SEVERI, W. Estado trófico na cascata de reservatórios de um rio no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 9(1), 124-133. 2014.
- LIMA, B. P. **Enquadramento de corpos d'água no nordeste brasileiro como instrumento de gestão e sustentabilidade ambiental: o caso da bacia hidrográfica do Acaraú do Meio – CE**. Tese (Doutorado), UFC. 2016.
- LIMA, B. P., MAMEDE, G. L., LIMA NETO, I. E. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 23, 125-135, 2018.
- MEIRELES, A. C. M., FRISCHKORN, H., ANDRADE, E. M. Sazonalidade da qualidade das águas do açude Edson Queiroz, bacia do Acaraú, no semiárido cearense. **Revista Ciência Agronômica**, 38(1), 25-31. 2007.
- MESQUITA, T. P. N. **Eutrofização e capacidade de carga de fósforo de seis reservatórios da bacia do rio Seridó, região semiárida do Estado do RN**. Dissertação (Mestrado), UFRN. 2009.
- ODUM, E. P. **Fundamentals of Ecology**. 3ed. W. B. Saunders Company. Philadelphia. London. Toronto. 1971.
- OLIVEIRA, J. N. P. **A influência da poluição difusa e no regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical**. Dissertação (Mestrado), UFRN. 2012.
- PACHECO, C. H. A., CEBALLOS, B. S. O., LIMA NETO, I. E. Uma análise de regressão para determinação do nível de eutrofização de um reservatório do semiárido brasileiro. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, 9, 274-289, 2016.
- PACHECO, C. H. A., LIMA NETO, I. E. Effect of Artificial Circulation on the Removal Kinetics of Cyanobacteria in a Hypereutrophic Shallow Lake. **Journal of Environmental Engineering**, 143, 06017010, 2017.
- ROLIM, H. O. **Proposta de índice de estado trófico em reservatórios do semiárido a partir de dados da Bacia do Banabuiú, Estado do Ceará**. Tese (Doutorado), UFC. 2016.
- SALAS, H. J., MARTINO, P. A. A simplified trophic state model for warm water tropical lakes. **Water Research**, 25(3), 341-350. 1991.
- SILVA JÚNIOR, W. R. **Estudo do estado trófico em reservatório público de usos múltiplos em região do semiárido nordestino utilizando a técnica de modelagem computacional como ferramenta de gerenciamento da qualidade da água**. Tese (Doutorado), UFPE. 2012.
- SOUZA, F. F. C.; RIBEIRO, C. B. M.; FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; OTÊNIO, M. H. Modelagem do regime térmico de um reservatório tropical de abastecimento público, Juiz de Fora, MG, Brasil. **Rev. Ambient. Água**, 11(1), 60-74. 2016.
- TOLEDO JR., A P., TALARICO, M., CHINEZ, S. J., AGUDO, E. G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processos de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, 1-34. **Anais...** 1983.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI. Enfrentando a escassez**. Ed. Rima II E, 247p. 2003.
- VIDAL, T. F.; NETO, J. C. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, 18(4), 402-407, 2014
- VOLLENWEIDER, R. A. **Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication**. Paris, Rep. Organization for Economic Cooperation and Development – OECD, DAS/CSI/68.27, 192 p., 1968.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – princípios do tratamento biológico de águas residuárias**, v. 1, DESA-UFMG, ABES, Belo Horizonte, 2016.