

## IV-004 - DINÂMICA DO FÓSFORO EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

**Arthur Jordan de Azevedo Toné<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil (UFC). Mestre em Recursos Hídricos (UFC). Engenheiro da Companhia de Gestão de Águas do Estado do Ceará (COGERH).

**Iran Eduardo Lima Neto<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil (UFC). Mestre em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos (Universidade de Alberta, Canadá). Pós-doutor em Mecânica dos Fluidos Ambiental (Universidade de Cambridge, Inglaterra). Professor Adjunto IV da Universidade Federal do Ceará (UFC).

**Endereço:** Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental/UFC – Campus do Pici – Bloco 713, 1º andar – CEP: 60451-970 – Fortaleza (CE), Brasil – E-mail: [iran@deha.ufc.br](mailto:iran@deha.ufc.br)

### RESUMO

A eutrofização de lagos e reservatórios é um sério problema enfrentado pela comunidade científica e a sociedade em geral. Este problema pode ser ainda mais grave em regiões semiáridas, como o Nordeste Brasileiro, onde os reservatórios têm seus volumes reduzidos durante a estação seca e continuam recebendo nutrientes (notadamente o fósforo) provenientes de atividades urbanas, industriais e agropecuárias, acarretando em uma redução significativa na qualidade de suas águas. Nesse contexto, a modelagem da concentração de fósforo surge como uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. No presente estudo utilizou-se um modelo transiente de mistura completa para analisar a dinâmica do fósforo em 30 reservatórios do semiárido brasileiro, incluindo os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Bahia. Os resultados mostraram que o coeficiente de decaimento de fósforo nesses açudes é cerca de duas vezes superior àqueles observados em reservatórios de clima tropical e aproximadamente quatro vezes superior aos valores obtidos para reservatórios de clima temperado. Assim, propõe-se uma adaptação nas metodologias existentes para previsão da dinâmica do fósforo em açudes do semiárido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Açudes, Eutrofização, Modelagem Matemática, Nutrientes.

### INTRODUÇÃO

A eutrofização de corpos hídricos é um dos graves problemas ambientais, sanitários e econômicos enfrentados pela sociedade (VON SPERLING, 1996). Esse processo de degradação progressiva da qualidade da água tem sido potencializado devido a fatores como a erosão intensa, altas cargas poluidoras e baixas profundidades dos açudes do semiárido (FIGUEIRÊDO et al., 2007; BEZERRA et al., 2014; VIDAL & CAPELO NETO, 2014; BARBOSA & CIRILO, 2015). Como exemplo, pode-se mencionar um levantamento realizado recentemente pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH, 2016), em que mais de 80% dos 153 reservatórios monitorados por esta companhia já apresentam estado eutrófico ou hipereutrófico (ver Figura 1).

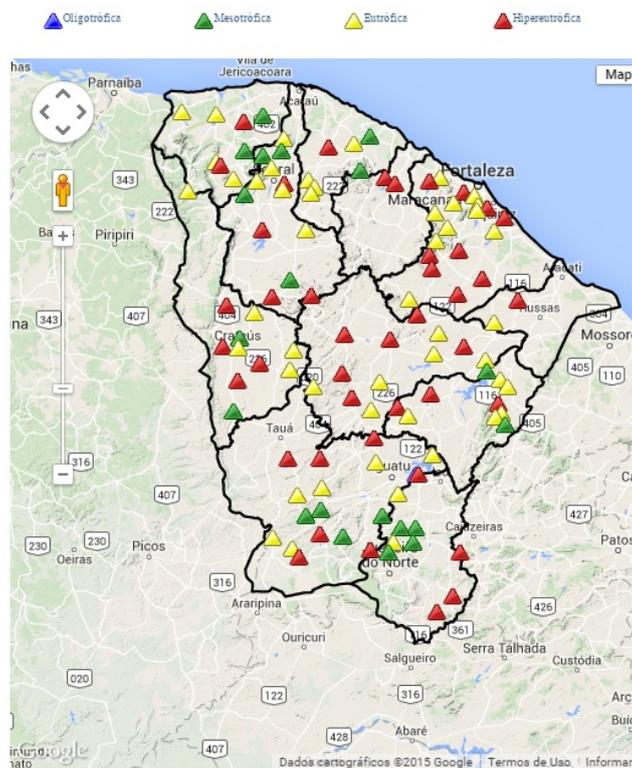


Figura 1: Estado trófico dos reservatórios cearenses (COGERH, 2016)

A modelagem matemática da qualidade da água remonta ao ano de 1925, quando Streeter e Phelps desenvolveram um modelo para previsão da concentração de oxigênio dissolvido em rios, constituindo um importante marco na história da engenharia de recursos hídricos. Outro marco histórico foi o modelo de Vollenweider (1968) para previsão da concentração de fósforo em lagos e reservatórios. Posteriormente, inúmeros modelos e estudos de simulação matemática da qualidade da água foram desenvolvidos (CHAPRA, 1997). Contudo, a utilização desses modelos, restringiu-se, principalmente, a rios e lagos de regiões temperadas. Na década de 1990, porém, algumas pesquisas visaram adaptação a corpos hídricos tropicais, como o modelo de Salas e Martino (1991). Contudo, as pesquisas não englobaram corpos hídricos localizados em regiões semiáridas.

O objetivo do presente estudo foi analisar os dados de qualidade da água disponíveis para açudes do Nordeste Brasileiro e propor uma nova metodologia para previsão da dinâmica do fósforo nesses corpos hídricos. Espera-se que a ferramenta proposta possa auxiliar na gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas.

## METODOLOGIA

Nesta pesquisa utilizou-se o modelo proposto por CHAPRA (1997), que descreve um balanço de massa, em regime de mistura completa, em que a concentração de fósforo ao longo do tempo é dada pela equação (1) e a sua respectiva solução analítica (2):

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

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

Sendo:  $\lambda = \frac{Q_s}{V} + k$ ,  $P(t)$  – concentração de fósforo total ao longo do tempo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $P_o$  – concentração de fósforo total no instante inicial ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $t$  – tempo (s);  $V$  – volume do reservatório ( $\text{m}^3$ );  $W$  – carga de fósforo afluyente ( $\text{kg}/\text{s}$ );  $Q_s$  – vazão de saída do reservatório ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $k$  – coeficiente de decaimento do fósforo ( $\text{s}^{-1}$ ).

A calibração desse modelo para reservatórios do semiárido constitui uma importante etapa para o processo de modelagem de fósforo nos açudes do Nordeste Brasileiro. Nesse caso, a variável sujeita à calibração é o coeficiente de decaimento do fósforo  $k$ . Vollenweider (1968) propõe que para lagos em regiões de clima temperado,  $k$  está correlacionado ao inverso da raiz do tempo de residência hidráulica - TR. Salas e Martino (1991), de maneira similar, propõem que tal coeficiente é duas vezes maior em regiões de clima tropical.

No presente estudo, foram obtidos dados de monitoramento hidrológico e de concentração de fósforo de 30 reservatórios do nordeste brasileiro localizados nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Bahia. Salienta-se que os açudes selecionados possuem capacidades variando entre aproximadamente 0,5 e 34.000 hm<sup>3</sup>. Em seguida, de posse dos dados, foram calculados os valores do coeficiente de decaimento de fósforo ( $k$ ) usando a equação 2, os quais foram comparados com aqueles obtidos por Vollenweider (1968) e Salas e Martino (1991).

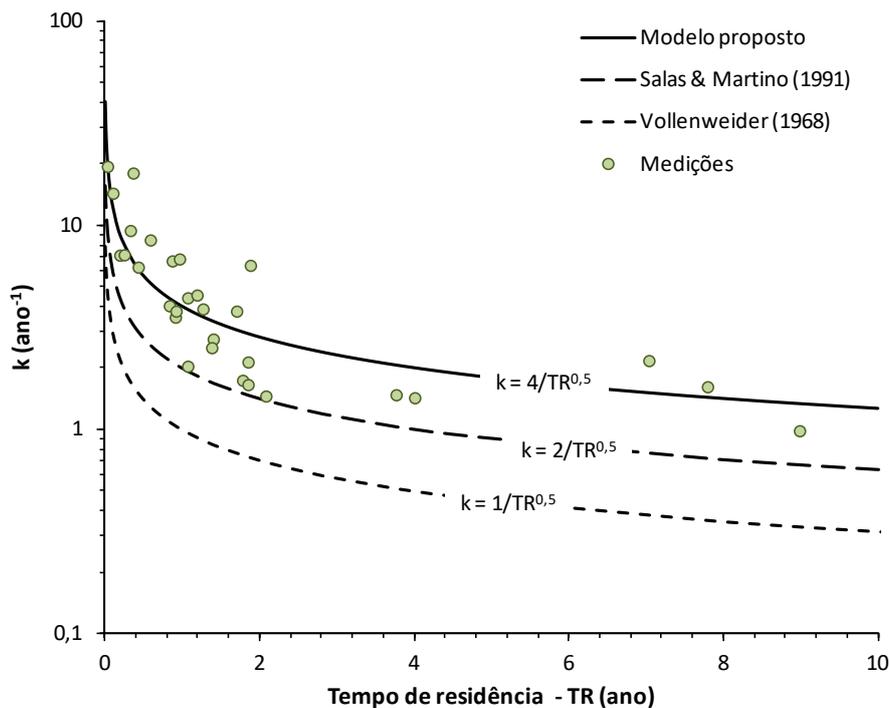
## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A Tabela 1 mostra os tempos de residência hidráulica (TR) e os coeficientes de decaimento de fósforo ( $k$ ) obtidos no presente estudo para cada um dos 30 reservatórios selecionados. Pode-se observar que os valores de  $k$  ajustados para o semiárido brasileiro são significativamente superiores àqueles obtidos através da equação 3 (Vollenweider, 1968) e da equação 4 (Salas e Martino, 1991) para regiões temperadas e tropicais, respectivamente.

**Tabela 1: Valores de TR e k obtidos para os 30 reservatórios selecionados, destacando os valores de k calculados pelas equações de Vollenweider (1968) e Salas e Martino (1991).**

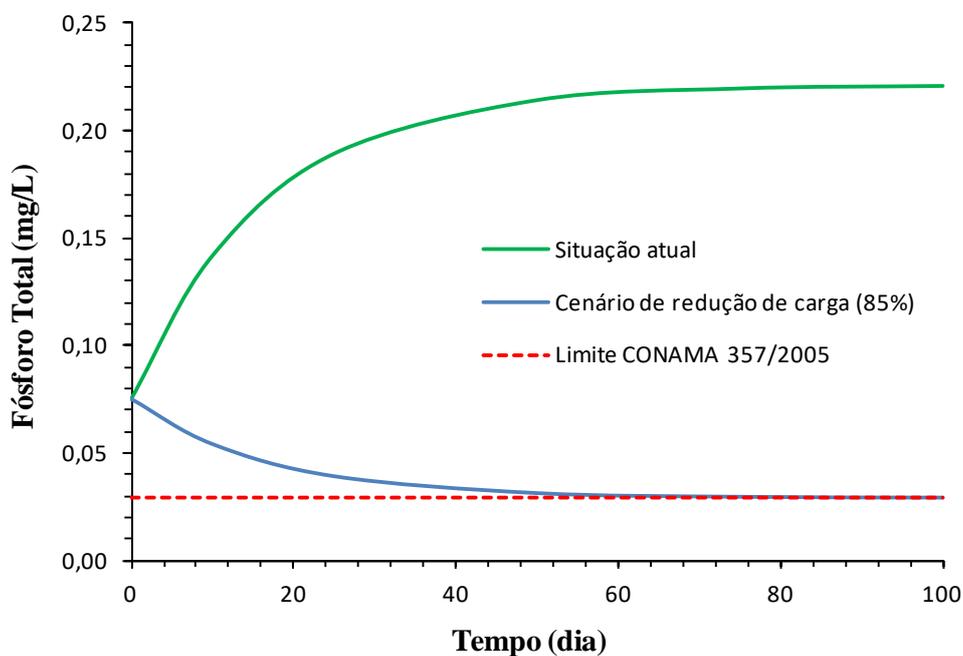
RESERVATÓRIOS	TR (anos)	k (ano <sup>-1</sup> )	k (Salas e Martino)	k (Vollenweider)
<b>CEARÁ</b>				
Forquilha	3,76	1,47	1,03	0,52
Orós	4,00	1,42	1,00	0,50
Castanhão	7,03	2,16	0,75	0,38
Gavião	0,10	14,26	6,24	3,12
Banabuiú	1,78	1,73	1,50	0,75
Acarape do Meio	1,85	2,12	1,47	0,74
Santo Anastácio	0,03	19,31	11,18	5,59
Arrebita	0,19	7,09	4,57	2,28
General Sampaio	1,88	6,32	1,46	0,73
Pacajus	1,40	2,75	1,69	0,85
Quixeramobim	0,43	6,19	3,05	1,52
Quincoé	1,07	4,38	1,93	0,97
Itaúna	0,25	7,12	4,00	2,00
Sítios Novos	1,85	1,64	1,47	0,74
Curral Velho	0,36	17,91	3,31	1,66
Colina	1,07	2,02	1,93	0,97
Rosário	0,87	6,64	2,14	1,07
Rivaldo de Carvalho	1,19	4,52	1,83	0,92
Flor do Campo	2,08	1,45	1,39	0,69
Edson Queiroz	1,70	3,77	1,53	0,77
Caxitoré	1,38	2,50	1,70	0,85
Canafístula	0,91	3,52	2,10	1,05
<b>RIO GRANDE DO NORTE</b>				
Gargalheiras	1,27	3,86	1,78	0,89
Cruzeta	0,33	9,36	3,49	1,74
Dourado	0,83	4,00	2,19	1,10
Passagem das Traíras	7,79	1,61	0,72	0,36
<b>PARAÍBA</b>				
Camalaú	8,98	0,98	0,67	0,33
Epitácio Pessoa	0,92	3,77	2,09	1,04
<b>BAHIA</b>				
Sobradinho	0,59	8,41	2,61	1,31
<b>PERNAMBUCO</b>				
Tapacurá	0,96	6,79	2,04	1,02

Seguindo a mesma sistemática dos trabalhos de Vollenweider (1968) e Salas e Martino (1991), que descrevem  $k = f(TR)$ , a Figura 2 mostra uma curva ajustada no presente estudo ( $k = 4/\sqrt{TR}$ ) para descrever a dinâmica do fósforo nos 30 açudes do semiárido brasileiro. Percebe-se um bom ajuste, resultando em um coeficiente de correlação de 0,85. Portanto, pode-se dizer que o coeficiente de decaimento de fósforo  $k$  nos açudes do semiárido é cerca de duas vezes superior àqueles observados em clima tropical e aproximadamente quatro vezes superior aos obtidos para reservatórios de clima temperado. Esses resultados mostram a influência da elevada temperatura da água (25-30°C) na dinâmica do fósforo em açudes do semiárido, que provavelmente promoveu uma maior taxa de crescimento do fitoplâncton, conforme descrito por Castagnino (1982). Além disso, também é prevista uma maior velocidade de sedimentação do fósforo devido à reduzida viscosidade da água. Portanto, sugere-se que esses dois efeitos (crescimento acelerado do fitoplâncton e aumento da velocidade de sedimentação) sejam responsáveis por um decaimento mais acentuado do fósforo com o tempo (valor de  $k$  mais elevado), em comparação com regiões de clima temperado/tropical.



**Figura 2: Curva ajustada para o coeficiente de decaimento de fósforo nos 30 açúdes do semiárido brasileiro ( $k = 4/\sqrt{TR}$ ), em comparação com as equações disponíveis para regiões de clima tropical ( $k = 2/\sqrt{TR}$ ) e temperado ( $k = 1/\sqrt{TR}$ ).**

Uma vez calibrado o modelo para o semiárido brasileiro, é possível se prever diferentes cenários de concentração de fósforo para os reservatórios. A Figura 3 mostra, como exemplo, simulações para o Açude Gavião, que abastece a Região Metropolitana de Fortaleza/CE. Observa-se que somente com reduções da carga afluenta da ordem de 85%, pode-se atender à Resolução CONAMA 357/2005 quanto ao parâmetro fósforo para mananciais de classe 02.



**Figura 3: Simulações da concentração de fósforo para o Açude Gavião, que abastece a Região Metropolitana de Fortaleza/CE.**

## CONCLUSÕES

- Desenvolveu-se um modelo relativamente simples para descrever a dinâmica do fósforo em açudes do semiárido brasileiro;
- Os valores do coeficiente de decaimento de fósforo ajustados foram significativamente superiores àqueles obtidos em regiões de clima tropical e temperado;
- Propôs-se uma equação para calcular o coeficiente de decaimento de fósforo em função do tempo de residência hidráulica dos açudes;
- Mostrou-se uma aplicação prática do modelo para prever o impacto da redução de cargas de fósforo afluentes aos açudes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. 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.
3. CASTAGNINO, W. A. Investigación de modelos simplificados de eutroficación en lagos tropicales. Organizacion Panamericana de la Salud, Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Versión Revisada, 1982.
4. CHAPRA, S. C. Surface Water-Quality Modeling, McGraw-Hill, 1997.
5. 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, p. 399-409, 2007.
6. SALAS, H. J.; MARTINO, P. A simplified trophic state model for warm water tropical lakes. Water Research. 25(3), 341-350, 1991.
7. VIDAL, T. F., CAPELO NETO, J. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 18 (4), 402-407, 2014.
8. 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, DAS/CSI/68.27, 192 pp.; Annex, 21 pp.; Bibliography, 61 pp, 1968.
9. 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, 1996. FADINI, P.S. Quantificação de carbono dissolvido em sistemas aquáticos, através da análise por injeção em fluxo. Campinas, 1995. Dissertação de mestrado-Faculdade de Engenharia Civil-Universidade Estadual de Campinas, 1995.