

## IV-138 - ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO COM BASE EM CLOROFILA *a* E FÓSFORO TOTAL – COMPARAÇÃO ENTRE EQUAÇÕES TIPO CARLSON

### **Edilene Pereira Andrade**

Engenheira Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Mestranda em Saneamento Ambiental no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pós-DEHA/UFC.

### **Nosliana Nobre Rabelo**

Administradora, Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará. Doutoranda em Recursos Hídricos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pós-DEHA/UFC.

### **Adriano Ricardo Almeida Alexandre**

Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará. Doutorando em Saneamento Ambiental no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pós-DEHA/UFC.

### **Fernando José Araújo da Silva<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil, Mestre e Doutor em Engenharia Civil. Professor Adjunto na UFC e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pós-DEHA/UFC.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Bloco 713, 1º andar, *Campus* do PICI, Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Brasil. CEP 60451-970. Fone: (85) 33669624. E-mail: fjas@deha.ufc.br.

### **RESUMO**

Os açudes (reservatórios artificiais) são mananciais muito importantes no semiárido brasileiro. No estado do Ceará, açudes de médio e grande porte estão distribuídos em 12 bacias hidrográficas, com um potencial de acumulação de mais de 19 bilhões de m<sup>3</sup>. Incrementos de demanda e pressões ambio-climáticas contribuem para um declínio geral na qualidade da água. Uma das maiores preocupações é o processo de eutrofização. O presente estudo aborda o assunto e traz um resumo da aplicação de modelos tradicionais para cálculo do Índice de Estado Trófico (IET) aplicado a um reservatório. O uso de diferentes métodos resultou em classificações sem distinções relevantes. Houve equivalência entre os resultados obtidos com os distintos modelos empregados no estudo, se considerados os elevados coeficientes de correlação. É possível, então, expressar os valores de IET entre os métodos com base em equações de regressão. Para o açude Acarape do Meio, corpo aquático do estudo, os resultados mostraram que, ao longo do tempo, houve tendência de incremento dos valores de IET. Também, ocorreu a predominância de índices de estado eutrófico e hipereutrófico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monitoramento ambiental, Eutrofização, Reservatórios no semiárido.

### **INTRODUÇÃO**

No Ceará, nordeste brasileiro, a construção de reservatórios tem sido a principal ação de infraestrutura para garantir oferta hídrica. Isto se deu ao longo de um século, com açudes de médio e grande porte, que somam 245 atualmente. Estas estruturas estão distribuídas pelas 12 bacias hidrográficas, com um potencial de acumulação de mais de 19 bilhões de m<sup>3</sup> (COGERH, 2015). Nos últimos anos, porém, a demanda tem crescido sem restabelecimento hábil dos volumes hídricos. A situação se agrava com uma crescente pressão sobre os mananciais, resultante do incremento populacional desordenado e pela irregularidade climática.

O cenário acima contribui para um declínio geral na qualidade da água. Neste contexto, um importante fenômeno que se desenvolve nos reservatórios é o da eutrofização. O acontecimento resulta do incremento da produtividade primária, conseqüente do aporte de nutrientes (N e P). O grau de trofia de um corpo aquático é expresso pelo IET (Índice de Estado Trófico), que determinado com base em concentrações, principalmente, de fósforo e clorofila *a*. São também empregados outros parâmetros como a concentração de nitrogênio e a transparência medida com disco de Secchi. Há diferentes equações e intervalos, que são empregados na classificação do grau de trofia (LAMPARELLI, 2004).

Dentre os diversos modelos para cálculo do IET, destaca-se o proposto por Carlson (1977). A metodologia de Carlson, por sua simplicidade e seu pioneirismo, tem sido uma das mais usadas para classificação trófica de corpos lênticos e com adaptações a estruturas lóticicas. Entretanto, destaca-se que a proposição foi baseada em dados de lagos e reservatórios de clima temperado. No Brasil, com clima mais quentes, há importantes

variações deste trabalho como nos estudos de Toledo Jr. *et al.* (1983), de Lamparelli (2004) e de Cunha *et al.* (2013). Há ainda uma variação, apresentada em Palvuk e Bij de Vaate (2013), que utilizam o conceito de Nível Trófico ( $N_{TR}$ ) em lugar de Índice Estado Trófico.

Apesar de comunicarem a mesma informação, as equações dos modelos são distintas em seus coeficientes, bem como os intervalos das escalas descritoras para cada grau de trofia. É relevante, portanto, estudar a relação entre os modelos para subsidiar melhor a interpretação dos resultados. O presente estudo busca comparar os modelos aqui mencionados, com aplicação em um reservatório no Ceará.

## METODOLOGIA

### Formulações do estudo

As equações empregadas no cômputo do IET, para as concentrações de fósforo total ( $P_T$ ) e clorofila *a* ( $Cl_a$ ) estão contidas na Tabela 1, com as respectivas referências. Já a Tabela 2 contém as classes de trofia em relação aos intervalos de valores calculado para o IET. Por fim, os valores das concentrações limites de fósforo total ( $P_T$ ) e clorofila *a* ( $Cl_a$ ) estão na Tabela 3.

**Tabela 1. Equações para cálculo de IET e classificação dos diferentes níveis tróficos**

Fonte	Designação do Modelo	Equações propostas
Carlson (1977)	A	$IET_P = 14,42.Ln(P_T) + 4,15$ $IET_{Cl_a} = 9,81.Ln(Cl_a) + 30,60$
Toledo Jr. <i>et al.</i> (1983)	B	$IET_P = 14,43.Ln(P_T) - 3,28$ $IET_{Cl_a} = 10,03.Ln(Cl_a) + 30,57$
Lamparelli (2004)	C	$IET_P = 6,06.Ln(P_T) + 34,46$ $IET_{Cl_a} = 4,91.Ln(Cl_a) + 46,73$
Cunha <i>et al.</i> (2013)	D	$IET_P = 3,987.Ln(P_T) + 40,815$ $IET_{Cl_a} = 3,624.Ln(Cl_a) + 47,85$
Pavluk e Bij de Vaate (2013)	E	$INT_P = 2,92.Log(P_T) + 0,22$ $INT_{Cl_a} = 2,54.Log(Cl_a) + 2,22$

**Tabela 2. Valores dos limites dos IET para os diferentes estados (níveis) tróficos.**

Classes	Nível trófico ( $N_{TR}$ )	Modelo				
		A	B	C	D	E
Ultra-oligotrófico	1	-	$\leq 24$	$\leq 47$	$\leq 51,1$	$\leq 2,0$
Oligotrófico	2	$\leq 30$	25-44	48-52	51,2-53,1	2,1-3,0
Mesotrófico	3	31-40	45-54	53-59	53,2-55,7	3,1-4,0
Eutrófico	4	41-60	55-74	60-63	55,8-58,1	4,1-5,0
Supereutrófico	5	-	-	64-67	58,2-59,0	5,1-6,0
Hipereutrófico	6	$> 60$	$> 74$	$> 67$	$> 59,0$	$> 6,0$

**Tabela 3. Limites de concentrações de fósforo total ( $P_T$ ) em  $\mu g$  P/L e clorofila *a* ( $Cl_a$ ) em  $\mu g/L$ .**

Nível trófico	Modelo									
	A		B		C		D		E	
	$P_T$	$Cl_a$	$P_T$	$Cl_a$	$P_T$	$Cl_a$	$P_T$	$Cl_a$	$P_T$	$Cl_a$
1	-	-	6,0	0,5	8,0	1,2	15,9	2,0	6,0	1,0
2	6,0	0,9	26,0	3,8	19,0	3,2	23,8	3,9	12,0	2,6
3	12,0	2,6	52,0	10,3	52,0	11,0	36,7	10,0	24,0	7,3
4	48,0	20,0	211,0	76,1	120,0	30,6	63,7	20,2	48,0	20,0
5	-	-	$> 211,0$	$> 76,1$	233,0	69,1	77,6	27,1	96,0	56,0
6	$> 48,0$	$> 20,0$	-	-	$> 283,0$	$> 69,1$	$> 77,6$	$> 27,1$	192,0	155,0

### O reservatório e os dados do estudo

O reservatório selecionado para este estudo foi o Açude Acarape do Meio, que tem sua barragem (nome oficial: Eugênio Gudín) em forma de arco tipo gravidade, construída em alvenaria de pedra, com perfil trapezoidal, sem sistema de drenagem. O sangradouro é do tipo soleira espessa e deságua na bacia do rio Barra Nova, retomando ao curso do rio Acarape. A barragem está localizada no município de Redenção, estado do Ceará, e dista cerca de 75 km de Fortaleza (COGERH, 2012). O açude possui uma bacia hidráulica de 221 ha e um volume armazenável de 34,1 milhões de m<sup>3</sup>. É operado pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). Sua finalidade principal é atender demandas na Região Metropolitana de Fortaleza.

Os dados foram obtidos a partir de estudos de monitoramento da COGERH em campanhas no intervalo de 2001 a 2013, exceto dos anos 2003, 2006 e 2007. O cálculo do IET foi relativo a amostras coletadas próximas à barragem do açude, aqui denominado Ponto 9 (Figura 1). As coordenadas no Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) são 9536381 e 522083, com cota aproximada de 105,6 m.



Figura 1. Ponto de coleta de amostras no açude Acarape do Meio, Ceará.  
Fonte: Google Earth (2016).

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 mostra os resultados dos valores IET obtidos com os diferentes modelos. Nesta tabela os valores são referentes à faixa de variação. Já a Tabela 5 mostra os valores médios e a equivalência destes com o Nível Trófico (referido na Tabela 3). Ao longo do tempo houve tendência de incremento dos valores de IET, com coeficiente de correlação ( $r$ ) variando de 0,669 com o modelo de Cunha *et al.* (2013) a 0,740 com o de Pavluk e Bij de Vaate (2013).

**Tabela 4. Faixa de resultados de IET no ponto mostrado no reservatório Acarape do Meio.**

Ano	Modelo				
	A	B	C	D	E
2001	51-65	50-64	56-61	54-59	4,2-5,6
2002	54-71	54-71	57-64	57-62	4,7-6,3
2004	52-81	52-81	54-68	53-64	4,1-7,2
2005	29-65	30-65	47-59	47-59	2,4-5,2
2008	60-76	59-72	59-66	58-64	5,2-6,5
2009	68-75	70-85	63-71	62-67	6,0-7,7
2010	56-72	57-72	58-65	56-61	5,0-6,5
2011	58-87	58-87	59-72	57-66	5,2-7,9
2012	70-86	70-86	64-71	61-65	6,4-7,8
2013	76-79	76-79	66-68	62-63	6,7-7,1

**Tabela 5. Médias para IET e equivalência de Nível Trófico no reservatório Acarape do Meio.**

Ano	Modelo									
	A		B		C		D		E	
	IET	N <sub>TR</sub>	IET	N <sub>TR</sub>	IET	N <sub>TR</sub>	IET	N <sub>TR</sub>	IET	N <sub>TR</sub>
2001	56	4	56	4	57	3	56	4	4,8	4
2002	64	6	64	4	61	4	59	6	5,6	5
2004	66	6	66	4	62	4	60	6	5,8	5
2005	45	4	44	3	53	3	53	3	3,9	3
2008	67	6	66	4	63	4	61	6	5,9	5
2009	74	6	74	4	66	5	64	6	6,6	6
2010	62	6	62	4	61	4	59	5	5,6	5
2011	72	6	73	4	65	5	61	6	6,6	6
2012	78	6	78	6	68	6	63	6	7,1	6
2013	77	6	77	6	67	6	63	6	7,0	6

Os resultados mostraram que dentre as 124 amostras empregadas no cômputo do IET, somente 12% representaram a mesma trofia (hipereutrófica) com os diferentes métodos. Entretanto, a correlação entre os métodos foi elevada, como apresentado na Tabela 6, que mostra a matriz de Pearson (para  $\alpha = 0,05$ ) relativa a esta declaração. Uma vez que os coeficientes de correlação foram bastante significativos, é possível expressar o valor do IET com base em equações de regressão entre os modelos.

Um destaque é dado pela distribuição de probabilidade de eutrofia ou de hipereutrofia. Isto foi estimado com simulação de Monte Carlo, com 1000 iterações, sob a hipótese de distribuição normal dos valores de IET. O risco de ocorrência de hipereutrofia variou entre os modelos, mas foi expressivamente dominante em pelo menos 3 (CARLSON, 1977; CUNHA *et al.*, 2013 e PAVLUK; BIJ DE VAATE, 2013). A definição preliminar dos intervalos atribui peso elevado à interpretação do IET. Trata-se, portanto, de uma componente subjetiva. A Tabela 7 mostra os valores probabilísticos de diferentes classes de trofia, com base na simulação.

**Tabela 6. Matriz de Pearson ( $\alpha = 0,05$ ) para os valores médios de IET.**

Fonte	Modelo	A	B	C	D	E
Carlson (1977)	A	1				
Toledo et al. (1983)	B	1,000	1			
Lamparelli (2004)	C	0,999	0,999	1		
Cunha et al. (2013)	D	0,977	0,977	0,977	1	
Pavluk e Bij de Vaate (2013)	E	0,998	0,998	1,000	0,976	1

**Tabela 7. Probabilidade (%) de ocorrência de graus de trofia, com classificação de acordo com os modelos do estudo no açude Acarape do Meio.**

Classificação	Modelo				
	A	B	C	D	E
Ultra e Oligotrófico	0,1	1,8	1,6	1,7	0,2
Mesotrófico	0,5	12,4	25,9	9,0	3,4
Eutrófico	28,9	67,0	35,2	18,4	16,7
Super e Hipereutrófico	70,5	18,8	37,3	70,9	79,7

## CONCLUSÃO

A utilização do IET é uma maneira prática e eficiente de mensuração da qualidade de corpos d'água, tornando mais fáceis interpretar e divulgar os resultados obtidos. O uso de diferentes métodos para se determinar os valores de IET resultou em classificações relativamente semelhantes para um mesmo resultado. Ainda assim, há pouca distinção na interpretação. É necessário avaliar previamente qual método se adequará melhor à região cujos dados foram obtidos, para que não se superestime o valor do IET, nem o subestime, mostrando uma realidade não compatível com a do corpo hídrico.

No escopo do estudo aqui apresentado houve equivalência entre os resultados obtidos com os distintos modelos empregados, se considerados os elevados coeficientes de correlação. É possível, então, expressar os valores de IET entre os métodos com base em equações de regressão.

Para o açude Acarape do Meio os resultados mostraram que, ao longo do tempo, houve tendência de incremento dos valores de IET. Também, ocorreu a predominância de índices de estado eutrófico e hipereutrófico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARLSON, R.E.A. Trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.
- CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M.C.; LAMPARELLI, M.C. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI<sub>TR</sub>). *Ecological Engineering* v. 60, n. 1, p. 126-134, 2013.
- LAMPARELLI, M.C. **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, 2004.
- TOLEDO, A., TALARICO M., CHINEZ, S.J., AGUDO, E.G. 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**, p. 1-34. Camboriú-SC, Setembro de 1983.
- PAVLUK, T.; BIJ DE VAATE, A. Trophic index and efficiency. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2013. 11-Sep-13 doi: 0.1016/B978-0-12-409548-9.00608-4.