

## **ESTUDO DA SENSIBILIDADE DO RISCO DE EUTROFIZAÇÃO NO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS QUE COMPÕEM O ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO MODIFICADO.**

*Juliana Alencar Firmo de Araújo<sup>1</sup>; Raquel Jucá de Moraes Sales<sup>2</sup> & Raimundo Oliveira de Souza<sup>3</sup>*

**Resumo** – Este trabalho teve como objetivo estudar o nível de sensibilidade para um risco de eutrofização tomando como base os principais parâmetros de qualidade que são usados no índice de estado trófico modificado ( $IET_M$ ). A pesquisa utilizou como metodologia a *fuzzificação* do  $IET_M$ , de modo a calcular o risco *fuzzy* para diferentes pontos do reservatório Acarape do Meio, e para diferentes meses do ano tomando como base os anos de 2001 e 2002. O estudo se desenvolveu através do cálculo do risco para diferentes combinações das substâncias disponíveis que compõem o  $IET$ . Os resultados mostraram que nas análises em que a clorofila-a foi incluída no processo de cálculo, o risco encontrado foi menor do que nas demais análises. Este resultado não deve ser generalizado para outros reservatórios.

**Palavras-Chave** – Eutrofização. Risco *fuzzy*. Índice de estado trófico modificado.

## **STUDY OF SENSITIVITY OF EUTROPHICATION RISK IN RESERVOIR ACARAPE DO MEIO DEPENDING ON PARAMETERS COMPOSING THE MODIFIED TROPHIC STATE INDEX.**

**Abstract** - This article aimed to study the sensitivity level for the eutrophication risk, taking as a basis the main quality parameters that are used in the modified trophic state index ( $TSI_M$ ). The research methodology used the  $TSI_M$ , as *fuzzy* set membership functions to calculate the *fuzzy* risk for different points of the reservoir Acarape do Meio, for different months of the year, during the years 2001 and 2002. The study was conducted through the calculation of risk for different combinations of substances available that compose the  $TSI$ . The results demonstrated that in analyzes in which chlorophyll a was included in the calculation process, the risk was lower than found in other analyzes. This result should not be generalized to other reservoirs.

**Keywords** – Eutrophication. *Fuzzy* risk. Modified trophic state index.

- 
- 1) Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CAPES. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. E-mail: [judiaraujo@yahoo.com.br](mailto:juliaraujo@yahoo.com.br);
  - 2) Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. E-mail: [raqueljuca@gmail.com](mailto:raqueljuca@gmail.com);
  - 3) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil, CEP 60445-760. E-mail: [rsouza@ufc.br](mailto:rsouza@ufc.br).

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e as transformações climáticas que vêm ocorrendo em escala global intensificam a necessidade de armazenamento de água em reservatórios artificiais. Por outro lado, os reservatórios estão sujeitos a diversos processos físicos, químicos e biológicos, que causam severas transformações nos aspectos da qualidade da água.

A eutrofização é um fenômeno típico de lagos e reservatórios, onde o tempo de residência da água em seu interior é muito grande. Assim, no controle da qualidade da água de um reservatório há necessidade de um conhecimento adequado de todas as cargas de nutrientes, sejam elas pontuais ou difusas, bem como da capacidade hidráulica deste reservatório em receber essas cargas.

A teoria *fuzzy* se fundamenta na representação matemática de alguns parâmetros, na forma de funções de pertinência, tendo como vantagem permitir uma avaliação das incertezas em qualquer processo físico, sem a necessidade de uma base de dados tão consistente.

A metodologia proposta permite que haja uma transformação dos índices de estado trófico modificado ( $IET_M$ 's) na sua forma determinística em forma de funções de pertinência. Com isso, pode ser realizada uma avaliação do nível de sensibilidade para o risco de eutrofização em função dos diferentes parâmetros que compõem estes índices no reservatório Acarape do Meio.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização e pontos de coleta do reservatório Acarape do Meio.

O açude Acarape do Meio faz parte da bacia hidrográfica do rio Pacoti com área de drenagem de  $210,96 \text{ km}^2$ . Este açude está localizado no município de Redenção e faz parte do sistema da bacia metropolitana. A capacidade da barragem é  $31.500.000,00 \text{ m}^3$  e a vazão regularizada é de  $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ . A cota do sangradouro é de  $130,02 \text{ m}$  e a largura de  $60,00 \text{ m}$ . A tomada d'água é do tipo galeria e o seu comprimento é de  $45,00 \text{ m}$ . (COGERH, 2011).

Foram selecionados 9 pontos georeferenciados que são monitorados periodicamente. É importante ressaltar que os pontos 1, 2 e 3 representam locais receptores d'água no reservatório em estudo. Os pontos 2 e 3 recebem contribuições de zonas urbanas, enquanto o ponto 1 recebe contribuições de zonas rurais. O ponto 8 está localizado próximo ao vertedouro do açude. Já o ponto 9 é um ponto situado nas proximidades da barragem.

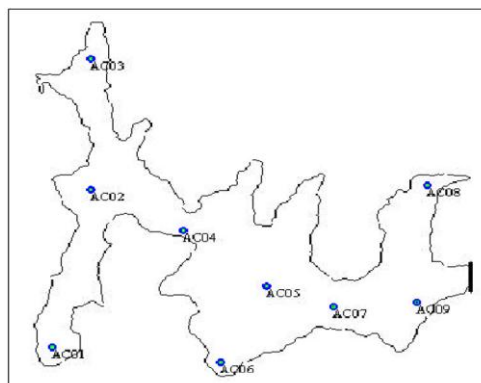


Figura 1—Localização das coordenadas dos pontos de coleta do açude Acarape do Meio. Fonte: COGERH, 2011.

## 2.2 Indicadores de qualidade.

O estado trófico de um corpo d'água pode ser expresso como a condição nutricional do mesmo, e nenhum simples indicador trófico ou parâmetro é completamente adequado para descrever e/ou quantificar este conceito. Apesar disto, alguns autores classificam os lagos em função de parâmetros que refletem a produtividade do corpo de água, ou seja, floração de algas, presença de macrófitas, oxigênio dissolvido etc. (VOLLENWEIDER, 1983; RAST & LEE, 1978).

De forma geral, são três os estados tróficos da água: oligotrófico (lagos claros e baixa produtividade); mesotrófico (lagos com produtividade intermediária) e eutrófico (lagos com elevada produtividade, comparado ao nível natural básico). Entende-se por produtividade de um corpo d'água a sua capacidade de propiciar e sustentar o desenvolvimento da vida (TOLEDO et al., 1984).

A caracterização do estado trófico é quantificada por meio de variáveis que se relacionam diretamente com o processo de eutrofização, em geral "clorofila-a" (admitida como uma medida da biomassa de algas), as espécies algáceas presentes, a transparência das águas e as concentrações de nutrientes e oxigênio dissolvido (HAYDÉE, 1995). O índice de estado trófico utiliza-se exatamente de algumas variáveis determinadas através de equações.

O IET de Carlson, pela sua simplicidade e objetividade, tem sido um dos mais largamente usados para classificação de lagos e reservatórios, embora tenha sido desenvolvido com base em dados de lagos e reservatórios de clima temperado.

Para se estabelecer os critérios de qualidade foram usados os *IET's* para fósforo total, ortofosfato solúvel e clorofila-a para região semiárida, desenvolvidos por Toledo *et al.* (1984), que propuseram uma modificação do *IET* de Carlson (1977), incluindo ainda uma expressão para o ortofosfato solúvel. As equações 2.1 a 2.3 exprimem o índice do estado trófico de Carlson modificado ( $IET_M$ ):

$$IET_M(PT) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{\ln \frac{80,32}{PT}}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.1)$$

$$IET_M(CL\_A) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{2,04 - 0,695 \ln CL\_A}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.2)$$

$$IET_M(OS) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{\ln \frac{21,67}{OS}}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.3)$$

Onde:

$PT$  → Concentrações de fósforo total;

$CL\_A$  → Concentrações de clorofila-a;

$OS$  → Concentrações de ortofosfato solúvel.

Foram feitas três análises para avaliar o nível de sensibilidade à eutrofização em função dos parâmetros de *IET*. No primeiro caso foram relacionados os três parâmetros: fósforo, ortofosfato e clorofila-a (equação 2.4). No segundo caso foram relacionados dois desses parâmetros: fósforo e

ortofosfato (equação 2.5). Já no terceiro caso foram relacionados o fósforo e a clorofila-a (equação 2.6). O fósforo foi mantido em todas equações por ser um elemento fundamental para o estudo. As outras relações foram estudadas, mas não apresentaram resultados significativos, então foram excluídas deste trabalho.

$$IET_M = \frac{IET_M (PT) + IET_M (CL\_A) + IET_M (OS)}{3} \quad (2.4)$$

$$IET_M = \frac{IET_M (PT) + IET_M (OS)}{2} \quad (2.5)$$

$$IET_M = \frac{IET_M (PT) + IET_M (CL\_A)}{2} \quad (2.6)$$

### 2.3 Teoria fuzzy.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965; ZIMMERMANN, 1985) é um método matemático usado para caracterizar e quantificar a incerteza e imprecisão nos dados e relações funcionais. Conjuntos difusos são úteis quando o número de dados não é suficiente para caracterizar a incerteza por meio de medidas padrão estatística envolvendo a estimativa de frequências.

De acordo com Ganoulis (1994) o conceito central da teoria dos conjuntos *fuzzy* é a função de pertinência que representa numericamente o grau em que um elemento pertence a um conjunto. Se um elemento pertence a um conjunto *fuzzy* em algum grau, o valor da sua função de pertinência pode ser qualquer número entre 0 e 1. Quando a função de pertinência de um elemento pode ter os valores 0 ou 1, apenas, a teoria dos conjuntos se reduz à teoria clássica dos conjuntos.

### 2.4 Aplicação da teoria fuzzy no índice de estado trófico modificado.

O trabalho visa fazer uma *fuzzificação* das equações (2.1) a (2.6) de modo que sejam incorporadas neste modelo as incertezas provenientes de medidas de observações de campo, deformidades das amostras de água em laboratório, entre outras. Para tal, as equações do  $IET_M$  se transformaram em:

$$\widehat{IET}_M (PT) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{\ln \frac{80,32}{\widehat{PT}}}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.7)$$

$$\widehat{IET}_M (CL\_A) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{2,04 - 0,695 \ln \widehat{CL\_A}}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.8)$$

$$\widehat{IET}_M (OS) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{\ln \frac{21,67}{\widehat{OS}}}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.9)$$

Onde:

$\widehat{IET}_M$  → Função de pertinência do  $IET_M$ ;

$\widehat{PT}$  → Função de pertinência para concentração de fósforo total;

$\widehat{CL\_A}$  → Função de pertinência para concentração de clorofila-a;

$\widehat{OS}$  → Função de pertinência para concentração de ortofosfato solúvel.

Para cada caso proposto têm-se as seguintes médias deste índice ( $\widehat{IET}_M$ ):

$$\widehat{IET}_M = \frac{\widehat{IET}_M (PT) + \widehat{IET}_M (CL\_A) + \widehat{IET}_M (OS)}{3} \quad (2.10)$$

$$\widehat{IET}_M = \frac{\widehat{IET}_M (PT) + \widehat{IET}_M (OS)}{2} \quad (2.11)$$

$$IET_M = \frac{\widehat{IET}_M (PT) + \widehat{IET}_M (CL\_A)}{2} \quad (2.12)$$

## 2.5 Cálculo do risco.

Se um evento, ou a realização de um perigo é descrito por meio da lógica *fuzzy*, então a confiabilidade desse evento pode ser calculado como um número *fuzzy*. Considere agora que o sistema tem uma resistência  $\tilde{R}$  e uma carga  $\tilde{L}$ , ambas representadas por números *fuzzy*. Uma medida de confiabilidade ou uma margem de segurança do sistema ( $\tilde{M}$ ) pode ser definida pela diferença entre a carga e resistência (SHRESTA *et al.*, 1990). No presente estudo, a carga poluente representa as concentrações medidas no reservatório que foram *fuzzificadas*. Já a resistência representa os limites dos diferentes estágios de eutrofização do corpo hídrico.

Assim, as duas categorias de funções de pertinência são definidas por:

$$\begin{aligned} \tilde{L} &= [L_L, L_M, L_U] \\ \tilde{R} &= [R_L, R_M, R_U] \end{aligned}$$

Onde:

- $\tilde{L}$  = Função de pertinência para a carga de concentração medida;
- $L_L$  = Limite inferior da carga com grau de pertinência 0 (zero);
- $L_M$  = Valor da carga com grau de pertinência 1 (um);
- $L_U$  = Limite superior da carga com grau de pertinência 0 (zero);
- $\tilde{R}$  = Função de pertinência para a resistência estabelecida por norma;
- $R_L$  = Limite inferior da resistência com grau de pertinência 0 (zero);
- $R_M$  = Valor da resistência com grau de pertinência 1 (um);
- $R_U$  = Limite superior da resistência com grau de pertinência 0 (zero).

Uma vez calculadas essas duas funções de pertinência, define-se a função marginal de segurança ( $\tilde{M}$ ) como:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (2.13)$$

É importante notar que:

- Se  $\tilde{M} \geq 0 \rightarrow RF = 0$  e  $GF = 1$
- Se  $\tilde{M} < 0 \rightarrow RF = 1$  e  $GF = 0$

Onde:

- $RF$  = Risco *fuzzy* que representa a possibilidade de falha do sistema;
- $GF$  = Garantia *fuzzy* que representa a segurança do sistema não falhar.

De acordo com a teoria *fuzzy*, o risco e a garantia são definidos por:

$$RF = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (2.14)$$

$$GF = \frac{\int_0^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (2.15)$$

Onde:

- $\tilde{M}$  = Função marginal de segurança;
- $m$  = Números *fuzzy* da função marginal de segurança.

### 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A pesquisa buscou fazer uma análise da sensibilidade dos diversos parâmetros na composição do IET, para o reservatório Acarape do Meio, localizado no estado do Ceará. Foram tomados como parâmetros para composição deste indicador de qualidade de nível trófico: o fósforo, o ortofosfato e a clorofila-a.

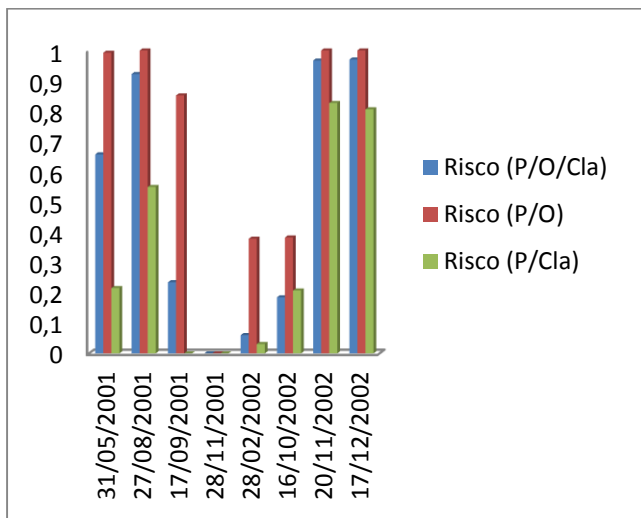


Figura 2 – Risco de eutrofização no ponto 1.

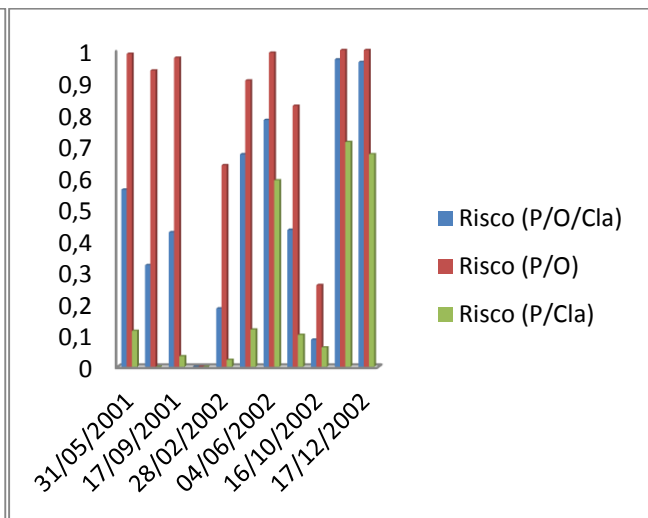


Figura 3 – Risco de eutrofização no ponto 2.

As figuras 2 e 3 mostram o risco de eutrofização para os pontos 1 e 2, para diferentes combinações dos parâmetros utilizados para a determinação do IET. Como pode ser visto na figura 2, o risco encontrado foi maior quando foram tomados o fósforo e o ortofosfato para servir de base de cálculo para o IET. Quando ortofosfato foi excluído, os valores do risco caíram de forma significativa. Por exemplo, na figura 2 a combinação mencionada foi a que deu o maior risco. Entretanto, deve ficar claro que isto não é uma tendência proveniente da combinação destes parâmetros. Este resultado pode ser apenas um indicador de que com a ausência do ortofosfato, o risco tende a ficar menor, porém do ponto de vista científico, não há qualquer indicador que comprove este fato.

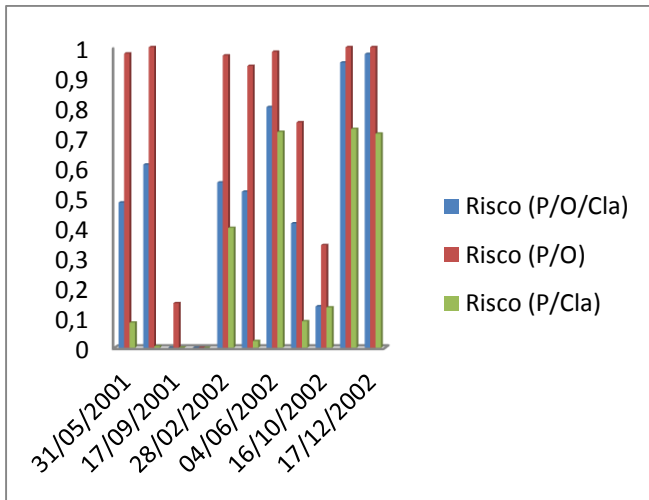


Figura 4 – Risco de eutrofização no ponto 3.

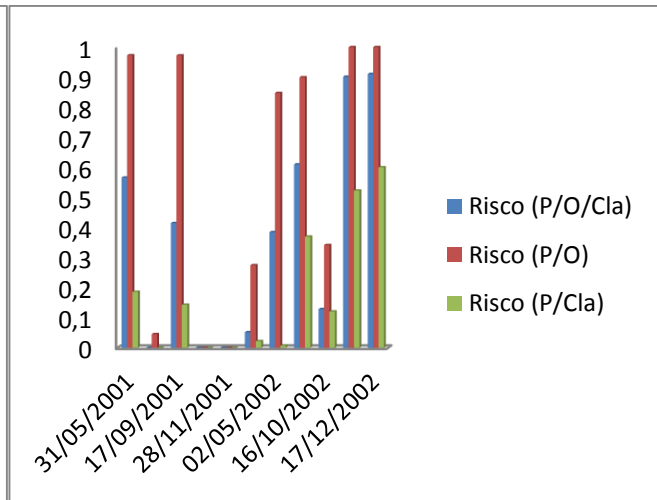


Figura 5 – Risco de eutrofização no ponto 4.

As figuras 4 e 5 mostram os resultados do risco de eutrofização para os pontos 3 e 4. Como se pode verificar, os resultados continuam mostrando a mesma tendência. Em cada ponto, em cada data, a retirada do ortofosfato torna o risco de eutrofização menor. Por exemplo, a presença do ortofosfato faz com que o risco chegue a quase 100% para cada ponto e para cada data em que os dados foram coletados. Mas sem a presença do ortofosfato, esse mesmo risco não passa de 30% em média. Isto confirma a análise anterior. Entretanto, deve ficar claro que não há qualquer comprovação científica para dizer que o ortofosfato é um parâmetro que determina o grau de eutrofização de um reservatório.

#### 4 CONCLUSÕES

A análise dos resultados permitiu concluir que, para o reservatório do Acarape do Meio, o ortofostato pareceu ser o parâmetro mais sensível para a determinação do risco de eutrofização, tomando com base o índice de estado trófico (*IET*). Os resultados encontrados mostram este fato, porém esses resultados não permitiram concluir que este seja um fato que pode ser generalizado para qualquer cenário de análise. Por exemplo, não há qualquer indicação de que isto é resultado de um processo científico. Ao contrário, há indícios de que este é um resultado proveniente do fato de que o ortofostato presente naquelas águas tinha um teor de concentração elevada o que acaba por determinar o controle do processo de cálculo.

#### AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos a Capes e ao CNPq e, pelo suporte financeiro através de bolsa de estudo que permitem que esta pesquisa se desenvolva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLSON, R. E. A Trophic State Index for Lakes. **Limnology and Oceanography**. v.22 (2), p.361-369, 1977.

**COGERH** - COMPANHIA DE GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS. Disponível em: [www.cogerh.com.br](http://www.cogerh.com.br). Acesso em: 02/02/2011.

GANOULIS, J. G. **Engineering risk analysis of water pollution: probabilities and fuzzy sets**. New York: VCH, 1994.

SHRESTA, B.P.; REDDY, K.R; DUCKSTEIN, L. Fuzzy reliability in hydraulics. In: **Proc. First Int. Symp. on Uncertainty Mod. and Analysis**, Univ. of Maryland, College Park, 1990.

TOLEDO, A. P.; AGUDO, E. G.; TOLARICO, M.; CHINEZ, S.J., A Aplicação de Modelos Simplificados para a Avaliação do Processo de Eutrofização em Lagos e Reservatórios Tropicais; **Anais do XIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – AIDIS**, Santiago do Chile, 1984.

ZADEH, L.A. **Fuzzy sets**. *Inform. Contr.* 8: 338-353, 1965.

ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy Set Theory and its Application**. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 363 pp., 1985.