

## Avaliação do risco de eutrofização em reservatórios da bacia do Acaraú, Ceará, Brasil

**Maria Cléa Brito de  
Figueirêdo**  
mariaclea@secrel.com.br

**Vicente de Paulo P. B.  
Vieira**  
vpvieira@ufc.br

**Francisco Suetônio Bastos  
Mota**  
suetonio@ufc.br

### Resumo

A eutrofização em reservatórios vem comprometendo a qualidade da água em todo o mundo. No estado do Ceará, Brasil os reservatórios Araras, Edson Queiroz e Jaibaras, localizados na bacia do Acaraú, apresentaram elevadas taxas de nutrientes, durante um ano de monitoramento, indicando um possível estado de eutrofização das águas. Esse trabalho tem como objetivo avaliar o risco de eutrofização desses reservatórios. Para tanto, foram utilizados um método de avaliação difusa e os seguintes métodos probabilísticos: Estimativa por Pontos (PEM), Simulação Monte Carlo, Valor Médio Primeira Ordem Segundo Momento (MFOSM) e Primeira Ordem Segundo Momento Avançado (AFOSM). Os resultados da avaliação mostram um risco superior a 50% nos três reservatórios, sendo o maior risco, entre 89 e 99%, encontrado no Edson Queiroz.

*Palavras-chave:* Análise de risco. Eeutrofização. Acaraú.

### Abstract

The eutrophication has compromised the water quality in reservoirs all over the world. In the state of Ceará, Brazil, the reservoirs Araras, Edson Queiroz and Jaibaras, located in the Acaraú waterbasin, presented high nutrient level, during a year of water monitoring, indicating a possible stage of water eutrophication. This work aims to assess the risk of eutrophication in these reservoirs. In order to make this evaluation, it was used a fuzzy risk method and the following probabilistic methods: Point Estimate Method (PEM), Monte Carlo Simulation, Mean Value First Order Second Moment (MFOSM) and Advanced First-Order Second-Moment (AFOSM). The results of this assessment show a risk superior of 50% in the three reservoirs, been found the higher risk, between 89 e 99%, in Edson Queiroz.

*Keywords:* Risk analysis. Eeutrophication. Acaraú.

## 1 Introdução

A eutrofização de águas continentais significa seu enriquecimento por nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, levando ao crescimento excessivo das plantas aquáticas, tanto planctônicas quanto aderidas, com conseqüente desequilíbrio do ecossistema aquático e progressiva degeneração da qualidade da água dos corpos lânticos. Em razão da eutrofização, muitos reservatórios e lagos no mundo já perderam sua capacidade de abastecimento de populações, de manutenção da vida aquática e de recreação. Vários trabalhos apontam para a gravidade do problema (VOLLENWEIDER, 1976; BENNION et al., 2005; PINTO-COELHO et al., 2005; ANA, 2005).

No Ceará, Nordeste do Brasil, o monitoramento da água de açudes nas bacias do Curu e Acaraú, que são mananciais de abastecimento humano, revela concentrações elevadas de nitrogênio e fósforo, sendo isto um fator de preocupação por parte do poder público e das populações usuárias das águas. De acordo com estudo realizado por ARAÚJO et al. (2006), em vários pontos dos reservatórios Araras, Edson Queiroz e Jaibaras, localizados nestas bacias, havia evidente indicação de eutrofização destes corpos d'água em todos os pontos, na maior parte do tempo, quando aplicado o Índice de Eutrofização

(IET) de Carlson, sugerido pela CETESB (2006). FIGUEIRÊDO et al. (2006) avaliaram o alto nível de vulnerabilidade do reservatório Edson Queiroz ao processo de eutrofização considerando fatores de pressão relativos ao transporte de sedimentos na sua microbacia, à carga de fósforo proveniente do esgotamento urbano, agricultura e aqüicultura e aspectos morfológicos dos açudes.

Uma característica em comum dos estudos realizados sobre avaliação do estado de trofia de reservatórios é a utilização de valores médios de fósforo total e clorofila “a” na avaliação da eutrofização. Valores médios, muitas vezes, refletem a existência de baixas concentrações de nutrientes em alguns meses do monitoramento e valores altos em outros meses, acarretando em desconhecimento do real risco do reservatório à eutrofização, considerando todos os valores obtidos e sua variabilidade.

A análise de risco é uma ferramenta valiosa na gestão dos recursos hídricos por possibilitar a quantificação da probabilidade ou possibilidades de ocorrência de um efeito indesejável, como o processo de eutrofização. Conhecendo-se o risco, é possível melhor gerenciá-lo, concentrando-se esforços e recursos na redução dos fatores de pressão que elevam o risco em determinadas áreas ou situações (CHAPMAN & WARD, 1997).

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o risco de eutrofização dos reservatórios Araras, Edson Queiroz e Jaibaras, localizados na bacia do Acaraú, Ceará, através dos métodos probabilístico e difuso.

## 2 Metodologia

### 2.1 A área de estudo

Os açudes Araras, Edson Queiroz e Jaibaras são os três maiores da bacia do Acaraú, localizada no oeste do Estado do Ceará, sendo responsáveis pela perenização do rio (Figura 1). Na região predominam os sertões, com topografia plana e levemente ondulada, clima semi-árido e domínio fisiográfico das caatingas. A precipitação média anual na região é de 803,18 mm (FUNCEME, 2004). A precipitação está concentrada entre os meses de janeiro a julho, tornando-se importante o armazenamento da água acumulada nestes meses, para uso durante o resto do ano pela população da bacia.

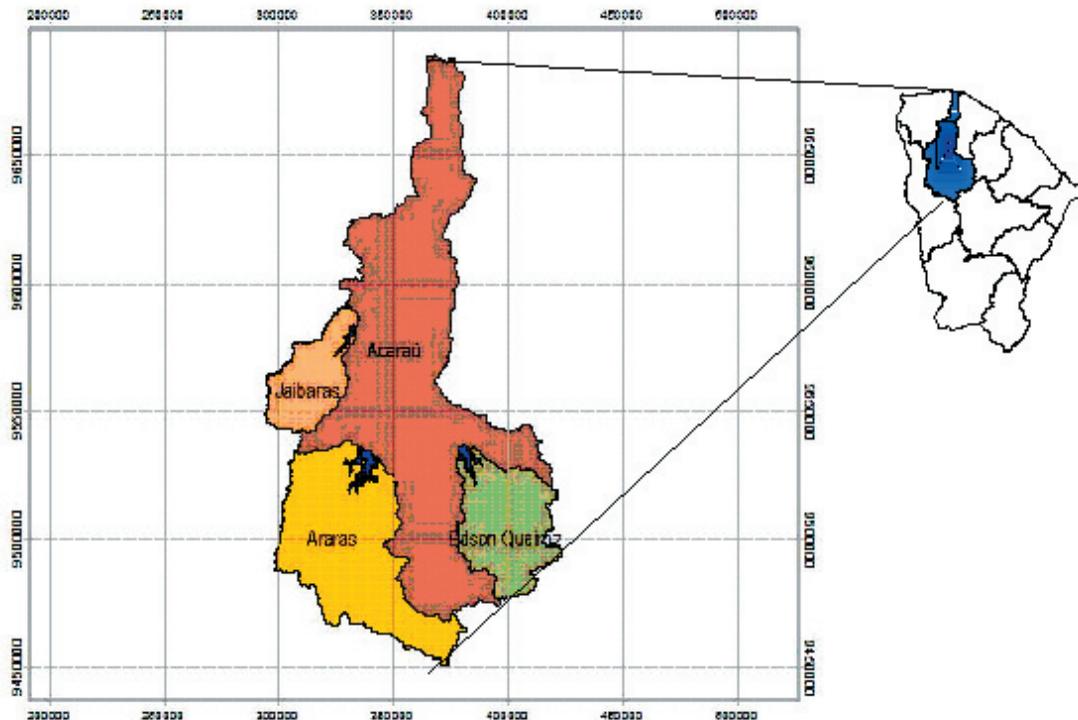


Figura 1: Açudes em estudo na bacia do Acaraú

O açude Araras, localizado no município de Reriutaba, data de 1958 e barra o Rio Acaraú em seu alto curso, sendo suas águas utilizadas no abastecimento de água dos municípios vizinhos e irrigação do perímetro Araras Norte.

O Açude Edson Queiroz, também conhecido como Serrote, está localizado no município de Santa Quitéria na parte alta da bacia do Acaraú, datando de 1987 o término de sua construção. Represa as água do rio Groairas, afluente do Rio Acaraú na parte alta da bacia. Atualmente o açude tem como finalidades o controle de enchentes do rio Acaraú, a perenização do rio Acaraú e o abastecimento d'água de Santa Quitéria.

O açude Jaibara ou Jaibaras, localizado em Sobral, é o mais antigo entre os estudados, datando de 1936 (DNOCS, 2006). O Jaibaras barra o rio Jaibaras, sendo suas águas utilizadas na irrigação, criação de tilápia em gaiolas e no abastecimento de vários municípios, dentre eles Sobral, o maior município da região. A Tabela 1 mostra a área inundada e o volume dos reservatórios do estudo.

**Tabela 1: Capacidade dos açudes estudados.**

Açudes	Área inundada (m <sup>2</sup> )	Capacidade (m <sup>3</sup> )
Araras	70.260.000	891.000.000
Edson Queiroz	17.710.000	254.000.000
Ayres de Souza	11.100.000	104.430.000

Fonte: COGERH (2006).

## 2.2 Coleta de dados nos reservatórios

Entre setembro/2004 e outubro/2005, foram coletadas amostras de água em quatro pontos no Edson Queiroz e Jaibaras e em sete pontos no Araras. Ao todo, foram analisados 35 pares de dados (clorofila “a” e fósforo total) do açude Araras, 22 pares do Edson Queiroz e 22 pares do Jaibaras.

As amostras de água foram coletadas na superfície da coluna d'água, na profundidade correspondente à extensão da zona eufótica, previamente estimada através de medidas com disco de Secchi. Foram analisados fósforo total e clorofila “a”, dentre outros parâmetros no Laboratório Integrado de Águas de Mananciais e Residuárias do CEFET-CE – LIAMAR/ CEFET-CE, seguindo a metodologia recomendada por APHA (1998), sendo que para clorofila “a” foi adotada a metodologia proposta por JONES (1979).

## 2.3 Avaliação do nível de trofia

Para avaliar o nível de trofia, foi aplicado o Índice de Estado Trófico (IET) desenvolvido por Carlson, modificado por TOLEDO et al. (1983) e TOLEDO (1990), utilizado pela CETESB (2006) na avaliação de reservatórios em São Paulo. O IET é composto pelo Índice de Estado Trófico da Clorofila (IET<sub>CL</sub>) e pelo Índice de Estado Trófico do Fósforo (IET<sub>P</sub>):

$$IET = \frac{IET_{CL} + IET_P}{2} \quad (1)$$

sendo

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

e

$$IET_P = 10 \left\{ 6 - \left[ \frac{\ln \left( \frac{80,32}{P} \right)}{\ln(2)} \right] \right\} \quad (3)$$

P = Fósforo Total (µg/L)

CL = Clorofila “a” (µg/L)

A classificação do nível de trofia é realizada conforme a Tabela 2.

**Tabela 2:** Classificação do estado trófico para reservatórios.

<b>Critério</b>	<b>Estado Trófico</b>
IET ≤ 44	Oligotrófico
44 < IET ≤ 54	Mesotrófico
54 < IET ≤ 74	Eutrófico
IET > 74	Hipereutrófico

Fonte: CETESB (2006).

### 2.4 Análise de distribuição e de correlação dos dados

Para a escolha dos possíveis métodos de análise de risco, foram realizadas em cada reservatório duas avaliações com os dados de clorofila “a” e fósforo total: tipo de distribuição dos dados e existência de correlação entre os mesmos. Na análise do tipo de distribuição, foi utilizado o software @Risk, realizando-se o teste Qui-Quadrado e avaliando-se o nível de confiança para 5%.

A distribuição normal foi a escolhida por apresentar níveis aceitáveis de confiança, conforme pode ser observado na Tabela 3.

**Tabela 3:** Valores do teste Qui-quadrado e níveis de confiança obtidos para a distribuição normal.

<b>Reservatório</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor do teste Qui-Quadrado</b>	<b>Valor tabelado do Qui-Quadrado</b>
Araras	Fósforo	10,06	12,59, para 7 intervalos, nível de confiança de 0,05
	Clorofila “a”	5,94	12,59, para 7 intervalos, nível de confiança de 0,05
Jaibaras	Fósforo	3,09	7,81, para 4 intervalos, nível de confiança de 0,05
	Clorofila “a”	2	7,81, para 4 intervalos, nível de confiança de 0,05
Edson Queiroz	Fósforo	1,636	7,81, para 4 intervalos, nível de confiança de 0,05
	Clorofila “a”	8,18	9,34, para 4 intervalos, nível de confiança de 0,025

Na avaliação da existência de correlação entre os dados de clorofila “a” e fósforo total, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, para um nível de significância de 5%. A Tabela 4 mostra que a correlação encontrada nesses reservatórios é muito fraca, tendo sido desconsiderada uma correlação entre clorofila “a” e fósforo no estudo.

**Tabela 4:** Correlação entre clorofila “a” e fósforo total.

<b>Açudes</b>	<b>Coefficiente de correlação de Pearson</b>	<b>Significância da correlação pelo teste T de Student</b>	<b>Valor tabelado para T, com confiança de 0,05</b>
Araras	-0,108	0,542	0,683
Jaibaras	0,129	0,567	1,725
Edson Queiroz	0,231	0,247	1,725

### 3 Métodos de avaliação do risco

Considerando que as variáveis clorofila “a” e fósforo total possuem distribuição normal e são não-correlatas, foram selecionados cinco métodos de avaliação do risco dos reservatórios à eutrofização: Estimativa por Pontos (PEM), Simulação Monte Carlo, Valor Médio Primeira Ordem Segundo Momento (MFOSM), Primeira Ordem Segundo Momento Avançado (AFOSM) e Método de Avaliação Difusa.

#### Estimativa por Pontos (PEM)

O método PEM baseia-se em uma analogia entre distribuição de probabilidade e distribuição de cargas em uma viga (Haar apud VIEIRA, 2005). O valor esperado corresponde ao centro de carga e o desvio padrão ao raio de giração.

Como serão utilizadas duas variáveis (clorofila “a” e fósforo total) na composição da função desempenho Z, o valor esperado de Z é dado por:

$$E(Z) = \mu_Z = P_{++}Z_{++} + P_{+-}Z_{+-} + P_{-+}Z_{-+} + P_{--}Z_{--} \quad (4)$$

onde

$$P_{++} = P_{+-} = P_{-+} = P_{--} = \frac{1}{4}$$

$$Z_{++} = f(\mu_P + \sigma_P; \mu_{CL} + \sigma_{CL})$$

$$Z_{+-} = f(\mu_P + \sigma_P; \mu_{CL} - \sigma_{CL})$$

$$Z_{-+} = f(\mu_P - \sigma_P; \mu_{CL} + \sigma_{CL})$$

$$Z_{--} = f(\mu_P - \sigma_P; \mu_{CL} - \sigma_{CL})$$

sendo

$E(Z)$  = valor esperado de  $Z$ ;

$P$  = probabilidade de ocorrência;

$\mu$  = média;

$\sigma$  = desvio padrão;

CL = Clorofila "a";

P = Fósforo Total.

O risco ( $K$ ) é obtido por:

$$K = 1 - \Phi\left(\frac{E(Z)}{\sigma_Z}\right) \quad (5)$$

onde

$$\sigma_Z = \sqrt{VAR(Z)}$$

$$VAR(Z) = E(Z^2) - [E(Z)]^2$$

$$E(Z^2) = \sum_{i,j=\pm} P_{i,j} * Z_{i,j}^2$$

sendo

$VAR(Z)$  = variância de  $Z$

$$\Phi\left(\frac{E(Z)}{\sigma_Z}\right) = \text{confiabilidade, obtida a partir da tabela de distribuição normal.}$$

### Método de simulação Monte Carlo

O método consiste na geração de números aleatórios entre 0 e 1 para as variáveis clorofila "a" e fósforo total, obtenção de valores correspondentes na função de distribuição normal para esses parâmetros e substituição desses valores na função de desempenho  $Z$  (Vose apud VIEIRA, 2005). No presente trabalho foram realizadas 4.000 simulações para números aleatórios de fósforo total e clorofila "a".

O risco é avaliado pela razão entre a quantidade de valores de  $Z$  negativos e a quantidade total de eventos de  $Z$  gerados, no caso, 4.000.

### Método Valor Médio Primeira Ordem Segundo Momento (MFOSM)

O método consiste na expansão da função desempenho  $Z$  em série de Taylor, em torno dos pontos médios das variáveis clorofila “a” e fósforo total, considerando-se os termos de primeira ordem:

$$Z_m = \mu_Z = f(\mu_{CL,P}) \quad (6)$$

$$VAR(Z) = \left(\frac{\partial Z}{\partial CL}\right)^2 * \sigma_{CL}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)^2 * \sigma_P^2 \quad (7)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{VAR(Z)} \quad (8)$$

$$RISCO = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (9)$$

onde

$\mu$  = média;

$\sigma$  = desvio padrão;

$VAR(Z)$  = variância de  $Z$ ;

$\Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right)$  = confiabilidade, obtida a partir da tabela de distribuição normal;

CL = Clorofila “a”;

P = Fósforo Total.

### Método Primeira Ordem Segundo Momento Avançado (AFOSM)

O AFOSM é um método mais avançado que o MFOSM, trazendo resultados mais precisos. Consiste no desenvolvimento da função desempenho  $Z$ , através da expansão da série de Taylor, em torno dos valores de fósforo total e clorofila “a” na superfície de falha, realizada de forma iterativa (VIEIRA, 2005). Expandindo-se a série de Taylor, considerando os termos de primeira ordem, tem-se que:

$$Z = f(P^*, CL^*) \quad (10)$$

$$P^* = \mu_P - \alpha_P \sigma_P \beta \quad (11)$$

$$CL^* = \mu_{CL} - \alpha_{CL} \sigma_{CL} \beta \quad (12)$$

$$\alpha_{i=C^*,P^*} = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial i}\right) * \sigma_i}{\sqrt{\sum_{i=CL,P}^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial i}\right)^2}} \quad (13)$$

$$Risco = 1 - \Phi(\beta)$$

onde

$P^*$  = variável reduzida de fósforo total na superfície de falha, encontrada de forma iterativa;

$CL^*$  = variável reduzida clorofila “a” na superfície de falha, encontrada de forma iterativa;

$\mu$  = média;

$\sigma$  = desvio padrão;

$\alpha$  = cosseno diretor obtido para as variáveis P\* e CL\* de forma iterativa;

$\beta$  = distância do plano tangente à superfície de falha, à origem do sistema de variáveis reduzidas P\* e CL\*. É calculado de forma iterativa, substituindo-se os valores de P\* e CL\* em Z, até seu valor obter convergência.

$\Phi(\beta)$  = confiabilidade, obtida a partir da tabela de distribuição normal;

### Método de Avaliação Difusa

O método é baseado na teoria dos conjuntos difusos (KAUFMANN & GUPTA, 1991). Nos conjuntos difusos, um elemento pode pertencer a mais de um conjunto, de acordo com sua pertinência ( $\mu$ ) que pode assumir valores entre 0 e 1. No método difuso, a função de desempenho em estudo é dada por:

$$\tilde{Z} = f(\tilde{P}, \tilde{CL}) \quad (14)$$

$\tilde{P}$  e  $\tilde{Z}$  são variáveis difusas que assumem forma triangular a partir de três valores: um mínimo ( $\mu = 0$ ), um máximo ( $\mu = 0$ ) e um valor mais provável ( $\mu = 1$ ).

As operações aritméticas com números difusos foram realizadas conforme KAUFMANN & GUPTA (1991), para os níveis de confiança 0, 0,25, 0,5, 0,75 e 1. O risco no método difuso é definido como:

$$Risco = \frac{\int_{z < 0} \mu_z dz}{\int_z \mu_z dz} \quad (15)$$

onde  $\mu_z$  é a função de pertinência de  $\tilde{Z}$ , que varia de 0 a 1.

## 4 Resultados e discussão

Conforme já declarado, no presente estudo foi adotada a distribuição normal para as variáveis independentes clorofila “a” e fósforo total, cujas médias e desvio padrão em cada reservatório estudado estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Valores médios e desvio padrão das variáveis fósforo e clorofila “a”.

Reservatório	Variável	Valor médio ( $\mu\text{g/L}$ )	Desvio padrão
Araras	Fósforo	223,23	151,37
	Clorofila “a”	15,1279	9,6687
Edson Queiroz	Fósforo	456,5	338,7
	Clorofila “a”	27,814	23,732
Jaibaras	Fósforo	318,39	251,10
	Clorofila “a”	4,0756	2,9688

A função desempenho para avaliação do risco é dada pela capacidade do sistema, referente ao limite de eutrofização do IET (55), diminuída da solicitação sobre o sistema, referente aos valores assumidos pelo IET. Assim, a função desempenho Z para a avaliação probabilística nesse trabalho é dada por:

$$Z = 55 - \text{IET} = 9,7165 + 7,2139 \ln(80,32/P) + 5,0137 \ln(CL) \quad (16)$$

A seguir serão apresentadas as avaliações de risco de eutrofização nos açudes Araras, Edson Queiroz e Jaibaras realizadas por quatro métodos probabilísticos e um método difuso.

### Método PEM

De acordo com o método PEM, o açude Edson Queiroz possui o maior risco de eutrofização (92%), enquanto o Jaibaras apresenta o menor risco (58%). A Tabela 6 mostra os cálculos intermediários na obtenção dos risco em cada açude.

**Tabela 6:** Avaliação do risco pelo método PEM.

Açude	$Z_{++}$	$Z_{+-}$	$Z_{+}$	$Z_{-}$	E(Z)	E(Z <sup>2</sup> )	E(Z) <sup>2</sup>	VAR(Z)	$\sigma_z$	Risco
Araras Edson Queiroz Jaibaras	-17,49	-9,90	-5,58	2,01	-7,74	109,77	59,90	49,86	7,06	86,21%
	-26,59	-13,81	-12,82	-0,04	-13,31	265,56	177,27	88,29	9,40	92,07%
	-14,20	-4,92	1,21	10,48	-1,86	84,32	3,45	80,87	8,99	58,32%

### Método Simulação Monte Carlo

Utilizando-se a simulação Monte Carlo, o risco de eutrofização foi avaliado em 94% no açude Edson Queiroz, 86% no Araras e 75% no Jaibaras. A Tabela 7 mostra o risco, os valores mínimo, máximo e médio assumidos pela função desempenho Z na simulação e o valor médio obtido pela substituição dos valores médios de fósforo total e clorofila “a” em cada reservatório.

**Tabela 7:** Avaliação do risco pela simulação Monte Carlo.

Açude	$Z_{\text{mínimo}}$ (simulação)	$Z_{\text{máximo}}$ (simulação)	$Z_{\text{médio}}$ (simulação)	Zmédio (obtido a partir dos valores médios)	Risco
Araras	-24,3667	52,31173	-8,37191	-11,2774	86,35%
Edson Queiroz	-32,5442	33,33237	-16,6454	-19,4914	94,50%
Jaibaras	-20,0903	44,898	-4,32515	-7,2632	75,55%

### Método Valor Médio Primeira Ordem Segundo Momento (MFOSM)

De acordo com o método MFOSM, o risco de eutrofização é maior no Edson Queiroz (99,88%) e menor no Jaibaras (85,99%). A Tabela 8 apresenta os valores assumidos pela função desempenho em cada açude, assim como o risco calculado.

**Tabela 8:** Avaliação do risco pelo MFOSM.

Açude	$Z_{\text{médio}}$	VAR(Z)	$\sigma_z$	Risco
Araras	-11,2774	34,0938	5,8389	97,32%
Edson Queiroz	-19,4914	41,2699	6,4241	99,88%
Jaibaras	-7,2632	44,8634	6,6980	85,99%

### Método Primeira Ordem Segundo Momento Avançado (AFOSM)

O cálculo do risco pelo AFOSM também mostra o açude Edson Queiroz como o que apresenta maior risco de eutrofização (89,62%). Embora o método MFOSM chegue a valores de risco superiores, vale ressaltar que o método AFOSM é mais avançado trazendo resultados mais precisos. A Tabela 9 mostra as iterações realizadas no cálculo do risco em cada reservatório.

**Tabela 9:** Avaliação do risco pelo AFOSM.

Açude	Interação	$\alpha_p$	$\alpha_{CL}$	$\beta$	P*	CL*	Risco
Araras	1ª	-0,8356	-0,5474	-1,22	68,9186	8,6709	87,49%
	2ª	-0,9430	-0,3453	-1,16	57,4352	11,2501	
	3ª	-0,9752	-0,2210	-1,15	52,9106	12,6621	
	4ª	-0,9832	-0,1823	-1,15	52,0790	13,0999	
Edson Queiroz	1ª	-0,7805	-0,6251	-1,42	81,9085	6,7478	89,62%
	2ª	-0,8603	-0,5096	-1,37	57,4767	11,2342	
	3ª	-0,9771	-0,2422	-1,26	37,8131	20,5253	
	4ª	-0,9959	-0,0895	-1,26	32,8370	25,1384	
Jaibaras	1ª	-0,8415	-0,5402	-0,79	150,8286	2,8038	78,23%
	2ª	-0,9146	-0,4042	-0,78	139,2583	3,1396	
	3ª	-0,9395	-0,3424	-0,78	134,3814	3,2826	

## Método de Avaliação Difusa

Na avaliação pelo Método Difuso, a função desempenho  $Z$  é dada pela seguinte expressão:

$$Z = 55 - IET = 9,7165 + 7,2139 \ln(80,32 / \tilde{P}) + 5,0137 \ln(\tilde{CL}) \quad (17)$$

$\tilde{P}$  (fósforo total) e  $\tilde{CL}$  (clorofila "a") são variáveis difusas que assumem distribuição triangular com valores mínimo, máximo e mais provável indicados na Tabela 10. Os valores foram obtidos a partir da análise dos dados do monitoramento da água nos açudes em estudo.

**Tabela 10:** Valores máximo, mínimo e mais provável para as variáveis difusas em estudo.

Açude	Fósforo total			Clorofila "a"		Mais provável
	Mínimo	Máximo	Mais provável	mínimo	máximo	
Edson Queiroz	0,04000	1,10000	0,34000	1,60	28,06	14,00
Jaibaras	0,04000	0,81000	0,28123	0,91	12,28	3,75
Araras	0,05000	0,70689	0,22250	0,55	34,13	15,18

Para os níveis de pertinência 0, 0,25, 0,5, 0,75 e 1 foram calculados os valores assumidos pela função desempenho  $Z$ , a partir dos valores assumidos pela variáveis fósforo total e clorofila "a" em cada nível de pertinência (Tabela 11). A Figura 2 apresenta os gráficos com as funções  $Z$  em cada reservatório.

**Tabela 11:** Valores assumidos por  $Z$  em cada nível de confiança.

Açude	Nível de confiança	Fósforo 1	Fósforo 2	Clorofila "a" 1	Clorofila "a" 2	Z1	Z2
Araras	0	50	706,89	0,55	34,13	-23,6719439	16,13572057
	0,25	93,1	585,77	2,705	27,89	-21,30376719	3,663254171
	0,5	136,2	464,65	4,86	21,65	-18,36288902	-2,01950646
	0,75	179,3	343,52	7,015	15,41	-14,47953741	-5,84322708
	1	222,4	222,40	9,17	9,17	-8,740605477	-8,74049363
Edson Queiroz	0	40	1100	1,6	28,6	-25,97558919	12,38913529
	0,25	115	910	4,7	24,95	-23,9231483	-0,63168005
	0,5	190	720	7,8	21,3	-21,44069999	-6,79346714
	0,75	265	530	10,9	17,65	-18,28811545	-10,871353
	1	340	340	14	14	-13,92407254	-13,9240725
Jaibaras	0	40	810	0,91	12,28	-19,52915421	15,21843794
	0,25	100,3075	677,8075	1,62	10,1475	-17,28751102	5,694674087
	0,5	160,615	545,615	2,33	8,015	-14,53966247	0,47639859
	0,75	220,9225	413,4225	3,04	5,8825	-10,98731003	-3,15699575
	1	281,23	281,23	3,75	3,75	-5,950516222	-5,95051622

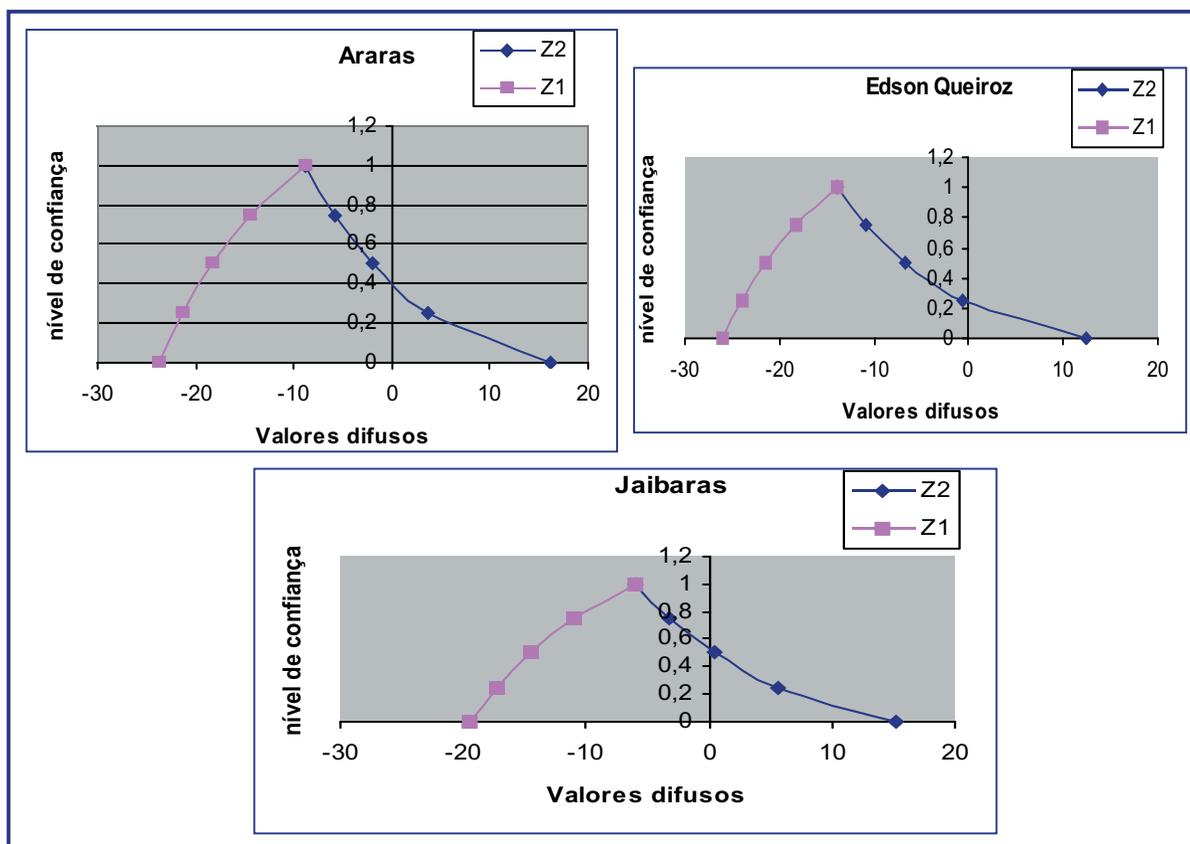


Figura 2: Função desempenho Z no método Difuso

O risco de eutrofização pelo método difuso avaliado é de 91,53% para o açude Edson Queiroz, de 85,28% para o açude Araras e de 78,83% para o Jaibaras. A Tabela 12 mostra o risco de eutrofização em cada reservatório, avaliado pelos métodos probabilísticos e difuso.

Tabela 12: Riscos avaliados pelos diferentes métodos

Açude	Método probabilístico				Método difuso
	PEM	Monte Carlo	MFOSM	AFOSM	
Araras	86,21%	86,35%	97,32%	87,49%	85,28%
Edson Queiroz	92,07%	94,50%	99,88%	89,68%	91,53%
Jaibaras	58,32%	75,55%	85,99%	78,23%	78,83%

## 5 Conclusões

Em todos os reservatórios estudados, o risco de eutrofização é superior a 50% por todos os métodos utilizados. A situação mais crítica encontrada ocorre nos reservatórios Edson Queiroz e Araras, estando o risco situado entre 89 e 99% e 86 e 97%, respectivamente.

Esse resultado é preocupante, uma vez que os referidos reservatórios são fontes de abastecimento para as populações residentes na região, devendo ser priorizadas ações que reduzam a carga de nutrientes nesses reservatórios, voltadas para melhoria nas condições de saneamento, redução da erosão e educação ambiental nessas áreas.

Os resultados obtidos são coerentes com os altos valores de fósforo total e clorofila “a” encontrados nos reservatórios em estudo, indicando congruência da análise realizada. Entretanto, sugere-se ampliação do monitoramento para melhor compreensão das correlações entre as variáveis clorofila “a” e fósforo total.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil*. Brasília, DF, 2005.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20. ed. New York, 1998.
- ARAUJO, L. F. P. et al. Nutrientes e grau de trofia dos principais reservatórios da bacia hidrográfica do Acaraú-CE-BR. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8., 2006, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ABES, 2006. 1CD-ROM.
- BENNION, H. et al. *Relatório de qualidade das águas no Estado de São Paulo 1995*. CETESB. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice\\_iva\\_iet.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice_iva_iet.asp)>. Acesso em: 11 maio 2006.
- CHAPMAN, C.; WARD, S. *Project risk management: processes, techniques and insights*. Nova York: Wiley, 1997.
- COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS. *Ficha técnica dos açudes*. Disponível em: <<http://www.cogerh.com.br/versão3/>>. Acesso em: 11 maio 2006.
- DNOCS. *Açude Jaibaras*. Disponível em: <[www.dnocs.gov.br](http://www.dnocs.gov.br)>. Acesso em: 11 jan. 2006.
- FIGUEIRÊDO, M. C. B. et al. Avaliação da vulnerabilidade à eutrofização da microbacia hidrográfica do Edson Queiroz – CE - BR. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8., 2006, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ABES, 2006. 1 CD-ROM.
- FUNCEME. *Planilha de dados pluviométricos do Estado do Ceará para o período 1974 a 1999*. Fortaleza, 2004.
- JONES, J. G. *A guide to methods for estimating microbial numbers and biomass in fresh waters*. London: Freshwater Biological Association, 1979. 112 p. n. 39.
- KAUFMANN, A.; GUPTA, M. M. *Introduction of fuzzy arithmetic: theory and applications*. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- PINTO-COELHO, R. M. et al. The nutritional status of zooplankton in a tropical reservoir: food quality and community structure. *Brazilian Journal of Biology*, São Carlos, SP, v. 65, n. 2, p. 1-13, 2005.
- TOLEDO, JÚNIOR, A. P. *Informe preliminar sobre os estudos para obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de reservatórios quentes tropicais*. São Paulo: CETESB, 1990. Relatório Interno.
- TOLEDO JÚNIOR, A. P. et al. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processos de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 12., 1983, Camboriú, SC. *Anais...* Camboriú, SC: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1983. 1 CD-ROM.
- VIEIRA, V. P. P. B. *Análise de risco em recursos hídricos: fundamentos e aplicações*. Porto Alegre: ABRH, 2005.
- VOLLENWEIDER, R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, Milano, v. 33, p. 53-83, 1976.

## SOBRE OS AUTORES

### **Maria Cléa Brito de Figueirêdo**

Graduação em Ciências da Computação pela UFC, Mestrado em Desenvolvimento Sustentável (Science and Technology Studies) pelo Rensselaer Polytechnic Institute, Estados Unidos. Atualmente, pesquisadora da Embrapa Agroindústria Tropical, com atuação em linhas de pesquisa relacionadas a Gestão Ambiental e Impacto ambiental. Doutoranda do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará – UFC.

### **Vicente de Paulo Pereira Barbosa Vieira**

Engenheiro Civil e Economista pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Hidrologia Aplicada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Ph.D. pela Colorado State University – CSU em Gestão dos Recursos Hídricos. Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA da UFC.

### **Francisco Suetônio Bastos Mota**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará. Mestre e Doutor pela Universidade de São Paulo. Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA da UFC.