

## IV-004 - MODELOS PARA ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DE APOORTE DE FÓSFORO NECESSÁRIA PARA CONTROLE DE EUTROFIZAÇÃO EM LAGOAS – ESTUDO DE CASO: LAGOA JACUNÉM, SERRA (ES)

**Priscilla Basilio Cardoso Barros Trindade<sup>(1)</sup>**

Bacharel e Licenciada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) (2009). Tecnóloga em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES) (2009). Mestranda em Engenharia Ambiental - Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Graduada em Engenharia Ambiental pelas Faculdades Integradas Espírito-Santenses (FAESA).

**Antônio Sérgio Ferreira Mendonça<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) (1975), mestre em Engenharia Civil pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (1977), doutor em Engenharia de Recursos Hídricos - Colorado State University (1987) (Estados Unidos) e pós-doutor pelo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Cornell University, em Nova York (Estados Unidos) (1998). Professor Associado 3 da Universidade Federal do Espírito Santo, Membro do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras - Vitória - ES - CEP: 29060-970 – Brasil – Tel: (27) 4009-2677 - e-mail: [priscillabasilio@gmail.com](mailto:priscillabasilio@gmail.com)

### RESUMO

Eutrofização se caracteriza pelo crescimento desordenado de microorganismos e pode tornar as águas impróprias para usos mais nobres. A maioria dos modelos matemáticos para a estimativa de eutrofização baseia-se na relação entre a carga de fósforo e a sua concentração resultante na massa d'água. A classificação dos corpos d'água pelo seu nível de trofia é feita com o objetivo de tomada de decisão a respeito de medidas preventivas ou corretivas. Tendo em vista os graves prejuízos socioeconômicos e ambientais provenientes da eutrofização de corpos d'água lênticos, é de grande importância o estudo de suas causas e de medidas que possam ser tomadas para mitigação. A lagoa Jacuném está localizada no município de Serra, estado do Espírito Santo. Concentrações de fósforo obtidas em monitoramentos realizados em 2007 e 2008 foram utilizadas para a estimativa do grau de trofia do corpo hídrico, por meio dos modelos matemáticos desenvolvidos por Vollenweider (1976) e Salas e Martino (1991). A lagoa Jacuném foi classificada entre mesotrófica e eutrófica. Recomenda-se estudos mais aprofundados e melhor manejo desses ambientes hídricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eutrofização, Fósforo, Lagos, Modelos Matemáticos.

### INTRODUÇÃO

Nutrientes (nitrogênio e fósforo) são componentes fundamentais dos ecossistemas aquáticos, mas o seu aporte excessivo pode promover a eutrofização de corpos d'água receptores. Eutrofização se caracteriza pelo crescimento desordenado de microorganismos e pode tornar as águas impróprias para usos mais nobres, assim como promover mudança na composição biótica de ecossistemas aquáticos devido à morte de animais superiores provocada pela redução de oxigênio dissolvido nas águas. Nitrogênio e fósforo podem entrar nos corpos hídricos dissolvidos em águas de escoamento superficial, aderidos aos sedimentos ou dissolvidos em águas de percolação (CAIADO, 2005).

O processo de eutrofização, nas águas interiores, ocorre principalmente em lagos e reservatórios, que são ambientes lênticos. Nos rios, ambientes lóticos, as condições ambientais, como turbidez e velocidades elevadas, resultam na menor ocorrência de eutrofização (SILVA, 1998).

Lagos são corpos d'água naturais cujo movimento é bastante lento, quando comparado ao movimento dos rios. A atividade geológica natural é a principal responsável pela origem dos lagos, podendo levar milhares de anos ou estar associada a eventos catastróficos e súbitos. Por outro lado, os reservatórios são formados pela ação direta dos seres humanos, como o barramento artificial de um vale natural ou a formação artificial de lagos, não

associados a uma bacia de drenagem natural, e com as vazões defluentes sujeitas a controle (PORTO *et al*, 1991).

A literatura apresenta uma série de modelos empíricos simplificados para a estimativa da concentração de fósforo em um corpo d'água, em função da carga afluente, tempo de detenção características geométricas. Os modelos empíricos podem ser utilizados principalmente para estimativa do nível trófico do corpo d'água (uma vez estimada a concentração de fósforo) e estimativa da carga máxima admissível para que a concentração de fósforo resultante seja inferior ao da eutrofia (SILVA, 1998).

A Lagoa Jacuném está localizada no planalto de Carapina, município de Serra, Grande Vitória, ES. Serviu como manancial de abastecimento público de toda região de Carapina, no mesmo município, até fins de 1983, quando a Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) desativou os sistemas de captação e tratamento. Pelo fato de estar localizada em uma área sem planejamento urbano adequado, a lagoa vem sofrendo agressões ambientais principalmente através de lançamentos de efluentes sanitários e de uso indiscriminado do solo, comprometendo assim a qualidade de água do manancial (SILVA, 1998).

Esse corpo hídrico foi caracterizado como um ambiente de alta produtividade, após monitoramento diversos parâmetros físico-químicos e biológicos, entre eles oxigênio dissolvido, fósforo total, clorofila-a e transparência (SILVA e MENDONÇA, 2001).

Segundo von Sperling (2005) a eutrofização artificial de muitos lagos e reservatórios está geralmente associada a um processo de poluição. A urbanização sem estrutura e planejamento, e o uso intensivo de insumos agrícolas contribuem para o aporte de nutrientes e agrotóxicos aos corpos d'água, deste modo, acelerando o processo natural de eutrofização e afetando a qualidade da água.

A área da bacia de contribuição da lagoa Jacuném é de 35 km<sup>2</sup>, a profundidade média estimada é 1,8 m, o volume médio corresponde a 2550000 m<sup>3</sup> e a vazão média é de 513 l/s. A lagoa possui três principais córregos afluentes: Jacuném, Veneer e Barro Branco. Deságua no córrego Jacuném que juntamente com o efluente da lagoa Largo do Juara forma o rio Jacaraípe (SILVA, 1998).

A Lagoa Jacuném está localizada na bacia hidrográfica do Rio Jacaraípe. Os bairros abrangidos pela bacia apresentam uma população total de aproximadamente 140.000 habitantes. A bacia está geograficamente localizada nas coordenadas 20°10'S e 40°14'W, em área fortemente urbanizada, estando inserida nesta o Centro Industrial de Vitória (CIVIT I e II) (SEMMA, 2009).

Do total de esgotos domésticos gerados na bacia hidrográfica do rio Jacaraípe, apenas uma pequena parte é coletada e encaminhada para Estações de Tratamento de Esgotos de lagoas de estabilização que, no entanto, não promovem a remoção devida de fósforo e nitrogênio, liberando estes elementos para os corpos d'água receptores (SEMMA, 2009).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Dois modelos matemáticos utilizados como instrumentos de gerenciamento na avaliação do processo de eutrofização em corpos d'água, aplicados ao nutriente limitante, fósforo foram aplicados à lagoa estudada.

O primeiro deles, desenvolvido por Vollenweider (1976 *apud* SILVA, 1998), para lagos temperados, é conhecido e aplicado mundialmente (SILVA e MENDONÇA, 2001). Sua equação empírica é expressa na forma:

$$P_r = L_c / q_s(1 + \sqrt{t}) \quad \text{equação (1)}$$

Onde:  $P_r$  = concentração de fósforo no reservatório (mg P/m<sup>3</sup>)  $L_c$  = carga crítica de fósforo sobre a represa (mg P/m<sup>2</sup> . ano)  $q_s$  = taxa de aplicação hidráulica =  $z/t$  (m/ano)  $z$  = profundidade média =  $V/A$  (m)  $t$  = tempo de detenção hidráulica =  $V/Q$  (anos)  $V$  = volume do reservatório (m<sup>3</sup>)  $A$  = área superficial do reservatório (m<sup>2</sup>)  $Q$  = vazão afluente ao reservatório (m<sup>3</sup>/ano).

O outro modelo matemático utilizado foi desenvolvido por Salas e Martino (1991), que analisaram dados experimentais de 40 lagos e reservatórios na América Latina e Caribe e adaptaram o modelo de Vollenweider (1976 *apud* SILVA, 1998) para ambientes tropicais, sendo expresso pela seguinte equação:

$$P_{\lambda} = L(P) / (Z / T_w (1 + 2 \sqrt{T_w})) \quad \text{equação (2)}$$

Onde:  $P_{\lambda}$  = fósforo total (mg/L)  $L(P)$  = taxa de carga de fósforo total superficial ( $\text{g m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ )  $Z$  = profundidade média do lago (m)  $T_w$  = tempo de detenção (ano).

Os dados de fósforo foram fornecidos pelo IEMA (Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo), referentes a monitoramentos realizados nos anos de 2007 e 2008. O ponto de monitoramento considerado se situa atrás do Clube Barcelona. Cabe observar que este ponto representa um dos locais com maiores concentrações de fósforo, na referida lagoa. Foram utilizados resultados de três campanhas realizadas em 2007 e quatro campanhas realizadas em 2008, sendo considerados o valor médio e o máximo na exemplificação da aplicação dos modelos.

Desenvolveu-se análise relativa à trofia da lagoa Jacuném. Cabe observar que o estudo de caso foi feito apenas com objetivo de exemplificação. Os cálculos de cargas de fósforo afluentes à lagoa requereriam intensivo trabalho de monitoramento de vazões e de concentrações de fósforo nos diversos cursos d'água afluentes. Na exemplificação foram analisadas tecnologias aplicáveis na redução de aporte de fósforo visando melhoria do estado de trofia do corpo d'água.

## RESULTADOS

### Classificação do grau de trofia: Salas e Martino (1991 *apud* SILVA, 1998) e Von Sperling (2005)

Para simples exemplificação da classificação do grau de trofia, foi considerada a vazão média total afluente através dos córregos Jacuném, Barro Branco e Veneer para a lagoa, em 1997. Foram considerados ainda, no exemplo, os valores de concentrações obtidos pelo IEMA em seu ponto de monitoramento de qualidade de água próximo do bairro Barcelona. Ressalte-se novamente o caráter de exemplificação de metodologia, que não visa obter parâmetros exatos para o corpo d'água.

Dados da Lagoa Jacuném:  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ): 0,513 (valor médio de 4 campanhas); Área ( $\text{km}^2$ ): 1,4; Volume ( $\text{m}^3$ ): 2550000;  $z$  (m): 1,8;  $T_w$  ( $V/Q$ ): 0,157 (SILVA E MENDONÇA, 2001).

As tabelas 1 e 2 apresentam os resultados referentes aos modelos de Vollenweider (1976) e de Salas e Martino (1991), respectivamente.

**Tabela 1: Cálculos relativos à Lagoa Jacuném – Modelo de Vollenweider.**

Dados	Anos	Fosfato Total (mg/L.ano)	$L(P)$ ( $\text{g/m}^2.\text{ano}$ )	Vollenweider $P_r$ (mg/L)
Média	2007	0,226	0,320	0,039
Média	2008	0,278	0,394	0,048
Máxima	2007/2008	0,429	0,608	0,074

**Tabela 2: Cálculos relativos à Lagoa Jacuném – Modelo de Salas e Martino.**

Dados	Anos	Fosfato Total (mg/L.ano)	$L(P)$ ( $\text{g/m}^2.\text{ano}$ )	Salas e Martino ( $\text{mg/m}^3$ ) $\lambda P$
Média	2007	0,226	0,320	50
Média	2008	0,278	0,394	62
Máxima	2007/2008	0,429	0,608	95

Tendo em vista que o modelo de Vollenweider foi desenvolvido para corpos d'água localizados em regiões de clima temperado, enquanto que o de Salas e Martino, para condições tropicais, este último foi considerado nas estimativas de eficiências de remoção de fósforo necessárias para melhoria das condições tróficas da lagoa.

Segundo Salas e Martino (1991 *apud* SILVA, 1998), valores de fósforo total menores que  $30 \text{ mg/m}^3$  correspondem a corpos de água oligotróficos, enquanto que valores entre  $30 \text{ mg/m}^3$  e  $70$

mg/m<sup>3</sup> correspondem a corpos de água mesotróficos, e valores acima de 70 mg/m<sup>3</sup> correspondem a corpos de água eutróficos.

A Tabela 3 apresenta síntese faixas de concentrações de fósforo correspondentes a diferentes classes de trofia para corpos de água, de acordo com von Sperling (2005).

**Tabela 3: Faixas aproximadas de valores de fósforo total para os principais graus de trofia.**

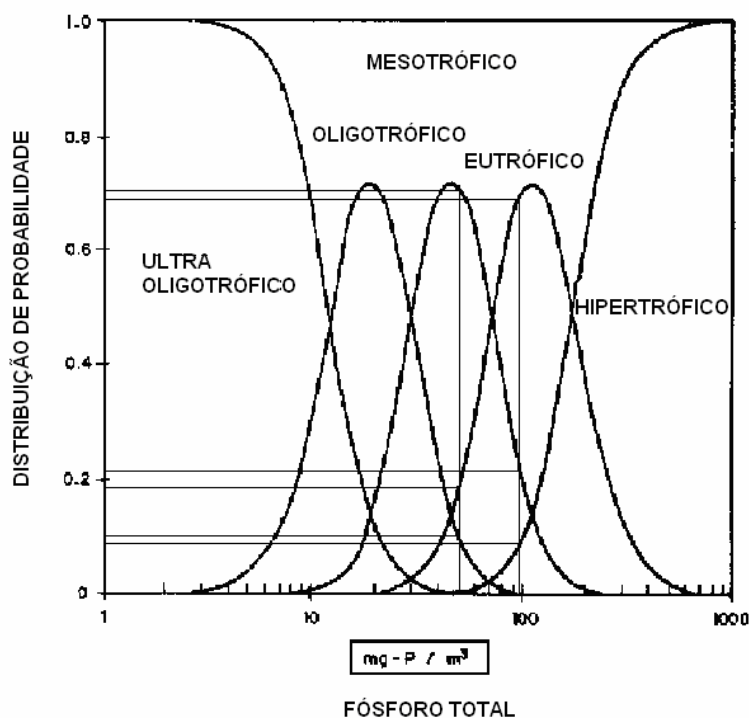
Classe de trofia	Concentração de fósforo total na represa (mg/m <sup>3</sup> )	Classe de trofia	Concentração de fósforo total na represa (mg/m <sup>3</sup> )	Classe de trofia
Ultraoligotrófico	< 5	Ultraoligotrófico	< 5	Ultraoligotrófico
Oligotrófico	< 10 - 20	Oligotrófico	< 10 - 20	Oligotrófico
Mesotrófico	10 - 50	Mesotrófico	10 - 50	Mesotrófico

A lagoa Jacuném recebe efluentes sanitários tratados por sistemas de tratamento, formados por lagoas de estabilização, provenientes de diversos conjuntos habitacionais. Entretanto, este tipo de sistema de tratamento (lagoa de estabilização) não é eficiente na retirada de nutrientes. Os resultados apresentados na tabela 2 calculados pelo modelo de Salas e Martino indicam um ambiente mesotrófico para eutrófico (menor média anual de concentração de fósforo 50 mg/m<sup>3</sup> de fósforo e máxima bianual 95 mg/m<sup>3</sup>). Caso se considere critério apresentado por Von Sperling (2005), o grau de trofia da lagoa Jacuném seria eutrófico.

SILVA (1998) realizou uma avaliação qualitativa da Lagoa Jacuném e de acordo com o modelo de Salas e Martino, a lagoa apresentou estado eutrófico nas quatro campanhas realizadas. Desta forma, os resultados obtidos no exemplo criado neste estudo, considerando concentrações obtidas em ponto situado na lagoa e vazões medidas em diferente período, utilizando o modelo de Salas e Martino e o critério apresentado por Von Sperling (2005) indicam condições eutróficas, da mesma forma que Silva (1998) e Silva e Mendonça (2001).

#### **Classificação através de distribuição de probabilidades de níveis tróficos**

Outra forma de classificação de trofia de corpos d'água utiliza gráfico de distribuição de probabilidades de níveis tróficos, de acordo com Salas e Martino (1991 *apud* SILVA, 1998) para lagos tropicais, apresentado na Figura 1. Os dados, referentes a fósforo total, considerados nesta análise, para a Lagoa Jacuném, foram 50 e 95 mg/m<sup>3</sup>, correspondentes aos valores mínimo e máximo, para os anos de 2007 e 2008, no ponto de monitoramento do IEMA.



**Figura 1: Distribuição probabilística de estado trófico baseada em fósforo total calculado.**

A Tabela 4 mostra as probabilidades correspondentes aos diversos estados tróficos, para a Lagoa Jacuném, obtidas a partir da Figura 1.

**Tabela 4: Faixas Distribuição de probabilidade do estado trófico da lagoa Jacuném.**

Fósforo (mg/m <sup>3</sup> )	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
50 (Mínimo 2007/2008)	10%	72%	18%	0%
95 (Máximo 2007/2008)	0%	21%	70%	9%

Considerando os valores apresentados na tabela 4, a lagoa apresentaria condições predominantemente mesotróficas e eutróficas. Cabe observar que esta classificação é semelhante à observada a partir dos outros métodos.

#### **Eficiência no tratamento para remoção de fósforo**

Também, apenas como exemplificação das metodologias, foi feita análise relativa a eficiências de remoção de fósforo necessárias para que a lagoa Jacuném se mantivesse no estado mesotrófico.

Considerando o limite 30 mg/m<sup>3</sup>, para que a lagoa se apresentasse mesotrófica, mesmo para a concentração mínima média anual de fósforo observada em 2007 e 2008, 50 mg/m<sup>3</sup>, seria necessária adoção de tecnologias de remoção de fósforo dos efluentes que são lançados na lagoa. A tabela 5 mostra as eficiências de remoção de fósforo necessárias, considerando as concentrações médias anuais e máxima bianual observadas no ponto de monitoramento, considerando a equação 3.

$$E = ((P_{\lambda} - 30) / (P_{\lambda})) \times 100 \quad \text{equação (3)}$$

Onde E = eficiência na remoção de fósforo,  $P_{\lambda}$  = concentração de fósforo.

**Tabela 5- Eficiências de remoção de fósforo necessárias para condições mesotróficas.**

Dados	Anos	$P_k$ (mg/m <sup>3</sup> )	Eficiência (%)	Dados
Média	2007	50	40,0	Média
Média	2008	62	51,2	Média
Máxima	2007/2008	95	68,4	Máxima

Os valores de eficiências de remoção de fósforo estimados indicam que, mesmo com grande parte do esgoto sanitário proveniente passando por sistemas de tratamento, as condições tróficas da lagoa não são adequadas. Isso mostra que os sistemas de tratamento atuais (compostos por lagoas de estabilização), não apresentam eficiências suficientes para evitar eutrofização da lagoa e necessitam de etapas complementares com tecnologias de precipitação química (70 a 90% de eficiência), adsorção por carbono (10 a 30% de eficiência) ou filtração (20 a 25% de eficiência). Reuso ou transferência, para bacias com maior capacidade de suporte, dos efluentes tratados correspondem a outras alternativas para manutenção de condições mesotróficas na lagoa. Investimentos para universalização da coleta e do tratamento de esgoto na bacia hidrográfica da lagoa Jacuném seriam também recomendáveis.

## CONCLUSÕES

A bacia da lagoa Jacuném é dotada de diversos sistemas de tratamento de esgotos sanitários. Contudo, os sistemas são formados por lagoas de estabilização que apresentam baixas eficiências de remoção de fósforo e nitrogênio.

O presente estudo não objetivou a definição exata das condições de trofia da lagoa e sim a demonstração de modelos que poderiam ser usados na prática com este fim, a partir de extensivo monitoramento qualitativo e quantitativo dos afluentes e do corpo d'água. Mesmo assim pôde ser verificado, como em outros estudos, que se fazem necessárias ações para reverter o estado de eutrofização da lagoa.

Implantação e operação adequada de sistemas de tratamento eficientes na remoção de nutrientes, reutilização de esgotos tratados, exportação dos esgotos tratados para outras bacias representam ações que poderiam ser adotadas no controle da eutrofização do corpo d'água.

Para que a aplicação dos modelos demonstrados no presente estudo possa obter resultados mais precisos para a definição de ações de controle se faz necessário extensivo monitoramento qualitantitativo de afluentes e do corpo receptor, com ênfase em nutrientes.

Recomenda-se estudos mais aprofundados a respeito da Lagoa Jacuném relacionados com nutrientes e fitoplâncton, incluindo caracterização de algas presentes e de toxicidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAIADO, M. A. C. **Modeling fate and transport of nitrogen and phosphorus in crop fields under tropical conditions**. 2005. 231 p. Tese (Doutorado em Biological Systems Engineering), Universidade Politécnica da Virgínia, Virginia, 2005.
2. PORTO, R. L. L. *et al.* **Hidrologia Ambiental**. 1ª Ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Vol. 3. 411p. 1991.
3. SALAS, H. e MARTINO, P. 1991. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. **Water Research**, Vol. 25, N° 3, p. 341-350. 1991.
4. SEMMA, Prefeitura Municipal da Serra. Recursos Naturais: Unidades de Conservação. **APA da Lagoa Jacuném**. Disponível em: <[http://www.ideiasonline.com.br/semma/index.php?tipo=institucional&id\\_cat=42&id\\_noticia=51](http://www.ideiasonline.com.br/semma/index.php?tipo=institucional&id_cat=42&id_noticia=51)> Acesso em: 14 de junho de 2009.
5. SILVA, L. H. P. **Avaliação Qualitativa da Lagoa Jacuném, com Ênfase em Eutrofização**. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Ambiental). 1998. 138 f. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1998.

6. SILVA, L. H. P. e MENDONÇA, A. S. 2001. **Avaliação e planejamento de qualidade de água da lagoa Jacuném, com ênfase em eutrofização.** In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001. Anais. Aracaju, SE, 2001.
7. VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Vol1. 3ª Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. 452 p. 2005.