

IV-104 - MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE USOS MÚLTIPLOS LOCALIZADO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Wamberto Raimundo da Silva Júnior⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (CT/UFPB). Mestre em Engenharia Urbana pela Universidade Federal da Paraíba (CT/UFPB). Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (CTG/UFPE). Professor do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) – Campus Afogados da Ingazeira.

Mario Takayuki Kato

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). PhD em Tecnologia Ambiental e Ciências da Agricultura pela Universidade Agrícola de Wageningen, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil (DEC) - Universidade Federal de Pernambuco.

Lourdinha Florencio

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). PhD em Tecnologia Ambiental e Ciências da Agricultura pela Universidade Agrícola de Wageningen, Holanda. Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil (DEC) - Universidade Federal de Pernambuco.

Endereço⁽¹⁾: Rua Edson Barbosa de Araújo, S/N - Manoela Valadares - Afogados da Ingazeira - PE - CEP: 56800-000 – Brasil – Tel: (81) 2125-1630 - e-mail: wamberto.junior@afogados.ifpe.edu.br

RESUMO

A eutrofização tem sido um dos principais problemas para a maioria das águas de superfície em todo o mundo. O objetivo do estudo foi analisar a qualidade da água e a dinâmica de nutrientes do reservatório público de usos múltiplos Epitácio Pessoa. A etapa preliminar do estudo foi fundamentada na avaliação da qualidade ambiental através das variáveis de qualidade da água e avaliação do estado trófico. Na etapa de planejamento, foi utilizado o modelo computacional BATHTUB como ferramenta de apoio no processo de simulação de cenários prognósticos de intervenções antrópicas na bacia de contribuição. Informações hidrológicas, morfológicas e de qualidade da água foram utilizadas para calibrar o modelo. A calibração com as informações regionais resultou num excelente ajuste entre as séries previstas e as observadas. Os resultados obtidos revelam predominância do reservatório no estado de eutrofia. Os cenários hipotéticos de simulação traçados demonstram a necessidade imediata de ações de curto, médio e longo prazo que visem a redução do aporte de nutrientes na bacia de contribuição do reservatório Epitácio Pessoa e consequentemente, o atendimento aos padrões ambientais. Considerando a limitação de informações técnicas disponíveis no sistema analisado, a performance dos resultados obtidos evidencia a aplicabilidade do modelo na região semiárida.

PALAVRAS-CHAVE: Estado trófico, modelagem computacional, reservatório público de água.

INTRODUÇÃO

O semiárido nordestino é considerado um sério desafio ao desenvolvimento econômico, social e ambiental por se tratar de uma região com processos de secas prolongadas e fortes impactos econômicos e sociais causados pela falta de correspondência entre a demanda e a oferta de água, além de apresentar condições ambientais desfavoráveis como altas taxas de evaporação, solos rasos e rios intermitentes com reduzida capacidade de autodepuração.

O estudo e o monitoramento do comportamento hidrodinâmico e dos aspectos limnológicos desses ambientes são importantes para a compreensão das funções ecológicas, econômicas e sociais. Possibilitando definir políticas para o uso da água e ações de controle da poluição. Outrossim, os estudos quali-quantitativos auxiliam na gestão, que tem por preceito fundamental garantir a qualidade de vida das populações usuárias dentro de uma perspectiva que não limite sua disponibilidade às gerações futuras.

Nessa perspectiva, os modelos de qualidade da água aplicados em reservatórios artificiais são ferramentas que permitem analisar os efeitos das ações naturais e antrópicas integradas sobre diferentes cenários de intervenção. A vantagem de um estudo de simulação de qualidade da água é a possibilidade de estimativa de efeitos cumulativos de um conjunto de empreendimentos em diferentes cenários de desenvolvimento.

Diversos modelos de qualidade da água em ambiente lântico estão disponíveis no mercado (EPA, 2012; US ARMI, 2012), muitos deles com aplicação consagrada em várias regiões do mundo, particularmente em regiões de clima temperado. Estudos da aplicação da modelagem computacional em reservatórios como ferramenta de gestão qualitativa dos recursos em regiões semiáridas ainda são incipientes.

Os primeiros estudos de simulação da qualidade da água em ambientes lóticos abordavam o impacto sobre a concentração de oxigênio dissolvido devido ao aporte de lançamentos pontuais de estações de tratamento de esgotos urbanos, representado através do parâmetro de demanda bioquímica de oxigênio. Streeter e Phelps, publicaram em 1925 a clássica solução analítica unidimensional para simulação de OD e DBO, aplicada ao Rio Ohio e, a partir de então, diversos pesquisadores aprimoraram o modelo conhecido como equação de Streeter-Phelps (CHAPRA, 1997).

A modelagem matemática do fenômeno de eutrofização teve início com a utilização de formulações empíricas que relacionavam as concentrações de fósforo total e clorofila-a (DILLON & RIGLER, 1974) bem como cargas de entrada/saída e concentrações de fósforo total no reservatório (VOLLENWEIDER, 1968; 1975). Estes modelos de estado estacionário foram os primeiros a utilizar a abordagem do balanço de massa para lagos (CHAPRA, 1975). Diversas modificações foram feitas para esses modelos iniciais, e os parâmetros foram estimados com base na aplicação de regressão linear em dados de series históricas de reservatórios existentes (LARSEN & MERCIER, 1976; CANFIELD & BACHMANN, 1981; HARPER, 1992).

Uma gestão eficaz dos recursos hídricos dos reservatórios artificiais no semiárido exige um bom domínio dos processos ecológicos no corpo hídrico. É importante que um sistema de gestão da qualidade da água, que fundamentalmente baseia-se em instrumentos que objetivam manter a poluição sob controle, seja operacional, ou seja, baseado em atividades e mecanismos de decisão de aplicação viável e eficiente. Propõe-se neste trabalho, estudar a dinâmica atual e futura do estado trófico do reservatório público Epitácio Pessoa, através da aplicação da técnica de modelagem matemática como ferramenta de gerenciamento da qualidade da água.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o reservatório público Epitácio Pessoa, conhecido popularmente por Boqueirão. O reservatório está inserido na bacia do Alto Paraíba e localizado entre as coordenadas 07°28'04'' e 07°33'32'' de longitude sul e 36°08'33'' e 36°16'51'' de longitude oeste, conforme visto na Figura 1. É o segundo reservatório do Estado em capacidade de acumulação, e o maior da bacia do rio Paraíba, apresentando atualmente um volume máximo de armazenamento de 411.686.287 m³ (PARAÍBA, 2004). O reservatório abastece a cidade de Campina Grande, a segunda maior do estado, e outras da circunvizinhança.

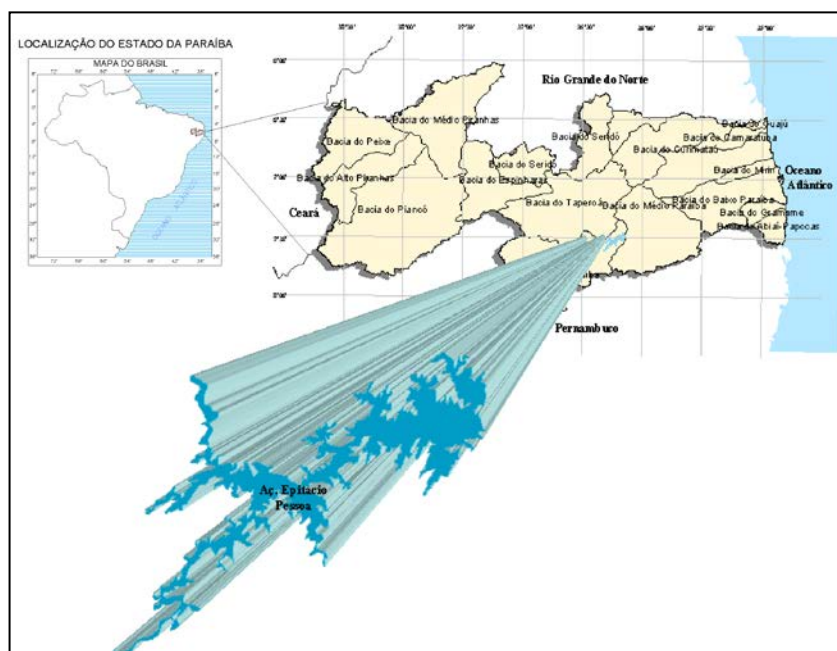


Figura 1: Mapa de localização do açude Epitácio Pessoa no contexto do estado da Paraíba.

COLETA DE TABULAÇÃO DE INFORMAÇÕES

As informações de parâmetros de qualidade da água do reservatório foram obtidas junto a Agência Nacional de Águas (ANA). O período de investigação compreende os meses de abril a novembro de 2009, totalizando 16 observações com frequência de amostragem de 15 dias. Os parâmetros de qualidade da água analisados foram: temperatura, transparência da água, fósforo total, nitrogênio total e clorofila-a. Como convenção, foi utilizado a nomenclatura BCi como os pontos localizados no espelho de água do reservatório; BTi nos tributários e BRP o rio principal.

CÁLCULO DO ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

A avaliação do estado trófico do reservatório Epitácio Pessoa foi desenvolvida através da aplicação do Índice de Estado Trófico (IET) de Carlson (1977) considerando sua ampla aplicação em sistemas ambientais. Carlson (1977) desenvolveu um índice de estado trófico - IET baseado em equações que utilizam variáveis limnológicas, o qual passou a ser amplamente utilizado no monitoramento da qualidade da água em virtude da facilidade de aplicação e obtenção das variáveis de entrada no modelo. O índice considera apenas a camada superficial sendo calculado para as variáveis fósforo total (Equação 1), clorofila-a (Equação 2) e transparência da água (Equação 3) numa escala numérica que varia de 0 a 100.

$$\text{IET(P)} = 4,15 + 14,42 \cdot \ln(\text{P}) \quad (1)$$

$$\text{IET(CHL-A)} = 30,6 + 8,84 \cdot \ln(\text{CHL-A}) \quad (2)$$

$$\text{IET(SEC)} = 60,0 - 14,41 \cdot \ln(\text{SEC}) \quad (3)$$

Onde:

IET (P) = índice de estado trófico para fósforo total; IET (CHL-A) = índice de estado trófico para clorofila-a; IET (SEC) = índice de estado trófico para a transparência; \ln (P) = logaritmo neperiano de fósforo total (mg/m³); \ln (CHL-A) = logaritmo neperiano para clorofila-a (mg/m³); \ln (SEC) = logaritmo neperiano da transparência (mg/m³).

APLICAÇÃO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA BATHTUB

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado o modelo computacional BATHTUB, desenvolvido para o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA por Walker (1999).

O modelo é formulado no estado estacionário de balanços de massa em uma rede espacialmente segmentada que representa o transporte advectivo, por difusão e sedimentação de nutrientes conforme Equação 4.

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = 0 = W_i + \sum_j \{Q_{ji}c_j - Q_{ij}c_i + E_{ij}(c_j - c_i)\} - k_i V_i c_i^2 \quad (4)$$

Onde: V_i = volume do segmento i (hm^3); c_i = concentração no segmento i (mg.L^{-1}); c_j = concentração no segmento adjacente j (mg.L^{-1}); W_i = carga externa direta para o segmento i (t.ano^{-1}); Q_{ji} = fluxo advectivo de entrada do segmento i para o segmento de montante j ($\text{hm}^3.\text{ano}^{-1}$); Q_{ij} = fluxo advectivo saída a partir do segmento i para o segmento de jusante j ($\text{hm}^3.\text{ano}^{-1}$); E_{ij} = fluxo difusivo entre segmentos adjacentes i e j ($\text{hm}^3.\text{ano}^{-1}$); k_i = coeficiente de sedimentação líquida de segunda ordem para o segmento i ($\text{m}^3.\text{g}^{-1}.\text{ano}^{-1}$).

Os modelos de retenção de nutrientes foram utilizados para estimar a remoção líquida de fósforo ou de nitrogênio em cada segmento. Resultados de pesquisas realizadas por Walker (1999) indicam que o modelo de decaimento de segunda ordem (Equação 5) é a formulação mais geralmente aplicável para a representação da sedimentação de fósforo e nutrientes em reservatórios.

$$W_s = K_2 \cdot C^2 \quad (5)$$

Onde: W_s = taxa de sedimentação de nutrientes ($\text{mg/m}^3.\text{ano}$); K_2 = taxa de decaimento efetivo de segunda ordem ($\text{m}^3/\text{mg}.\text{ano}$); C = concentração de nutrientes no reservatório (mg/m^3).

Para efeito de implementação do processo de modelagem, o reservatório Epitácio Pessoa foi discretizado em 7 segmentos, considerando as características morfológicas e ambientais (Figura 2). Os segmentos representam diferentes áreas do reservatório (por exemplo, reservatório superior, meio reservatório, perto da barragem). As setas invertidas refletem a simulação de dispersão longitudinal. As ramificações no esquema de segmentação refletem os principais tributários ou entradas externas.

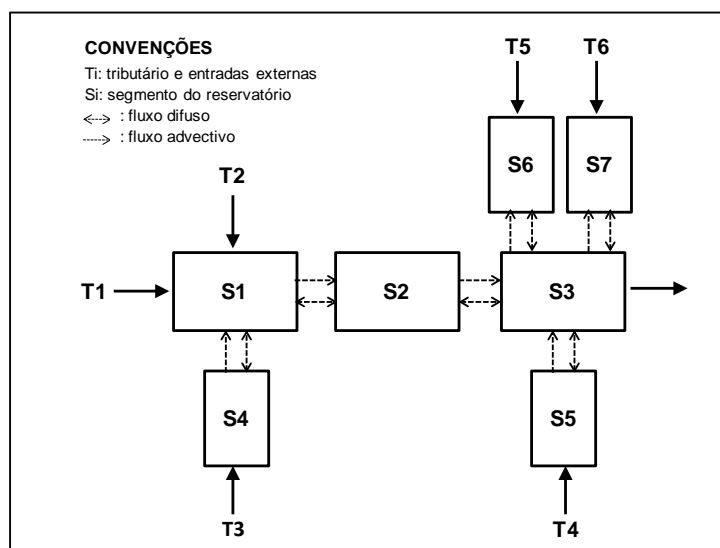


Figura 2: Discretização espacial do reservatório Epitácio Pessoa

As cargas de nutrientes superficiais foram calculadas considerando as concentrações médias das variáveis de qualidade da água, bem como as vazões médias afluentes oriundas do banco de dados HIDRO.

A carga de nutrientes via deposição atmosférica utilizada no processo de modelagem foi calculada utilizando a Equação 6.

$$C_{atm} = C_o \cdot P_m \quad (6)$$

Onde:

C_{atm} = carga de nutrientes via deposição atmosférica (g/m².ano); C_o = concentração de nutriente (mg/L);

P_m = precipitação anual média (mm/ano);

Utilizou-se como referência para a concentração atmosférica de nutrientes os valores de 0,02 fósforo total (kg/km².ano) e 0,2 nitrogênio total (kg/km².ano) determinados por Lewis (1981). O valor de 314,8 mm/ano foi utilizado como referência local para precipitação média.

A Tabela 1 apresenta as características morfológicas dos elementos computacionais utilizados no processo de modelagem.

Tabela 1: Características morfológicas dos elementos computacionais utilizados no processo de modelagem

Elemento	Área (km ²)	Comprimento (km)	Profundidade (m)
S1	17,1	9,27	6,5
S2	9,3	4,85	14,8
S3	10,6	5,37	29,8
S4	3,7	4,23	8,2
S5	2,5	2,71	15,3
S6	2,1	1,87	17,5
S7	3,3	3,19	18,7
T1	6717,4	-	-
T2	5668,3	-	-
T3	45,1	-	-
T4	84,0	-	-
T5	19,4	-	-
T6	16,1	-	-

Com vistas a avaliação e definição de planejamento e ações que visem a melhoria da qualidade da água, e consequentemente do estado trófico no reservatório Epitácio Pessoa, foram criados 5 cenários hipotéticos para simulação.

Os cenários delineados consideram a situação atual e a redução progressiva de cargas de nutrientes advindas da bacia de contribuição através de ações de curto, médio e longo prazo, tais como: investimentos do poder público na implantação de sistemas de esgotamento sanitário e melhorias das práticas de manejo e conservação do uso do solo, principalmente na agricultura de áreas de vazante no reservatório e recomposição da mata ciliar (Tabela 2).

Tabela 2: Cenários de simulação

Cenário	Descrição
0	Situação atual
1	Redução de 10%
2	Redução de 30%
3	Redução de 50%
4	Redução de 70%
5	Redução de 90% nos níveis de nutrientes

No procedimento para calibrar o modelo foram combinados condições observadas do reservatório fornecida ao BATHTUB realizado através da aplicação dos fatores de calibração, que modificam as respostas previstas pelos modelos empíricos no reservatório, as velocidades de sedimentação de nutrientes, concentrações de clorofila-a, profundidade, Secchi, velocidade de consumo de oxigênio e os coeficientes de dispersão.

RESULTADOS

A simulação do estado trófico calculada através do IET de Carlson para as variáveis de estado fósforo total, clorofila-a e transparência revela uma predominância do reservatório Epitácio Pessoa no estado eutrófico. Só através das condições de carregamento simulados no cenário 5 foi possível atingir, em alguns segmentos, o estado de mesotrofia (Figura 2).

O IET para clorofila-a apresentou comportamento assintótico, com valores oscilando entre 21,6 a 68,5, ambos no ponto BC4. Em alguns períodos o reservatório Epitácio Pessoa apresentou-se no estado oligotrófico, passando para mesotrófico e por fim eutrófico. O Índice de Estado Trófico de Carlson para o parâmetro transparência da água que variou de 50 (mesotrófico) no ponto BC1 (período de estiagem) a 70 (eutrófico) no ponto BC4 (período chuvoso). Analogamente ao IET-Ptotal, também se observa uma tendência de classificação do reservatório Epitácio Pessoa como eutrófico na maior parte do período de investigação. O trabalho de Bergman (1999) observou que a redução acentuada na transparência da água está associada com o aumento e concentrações de clorofila-a e fósforo.

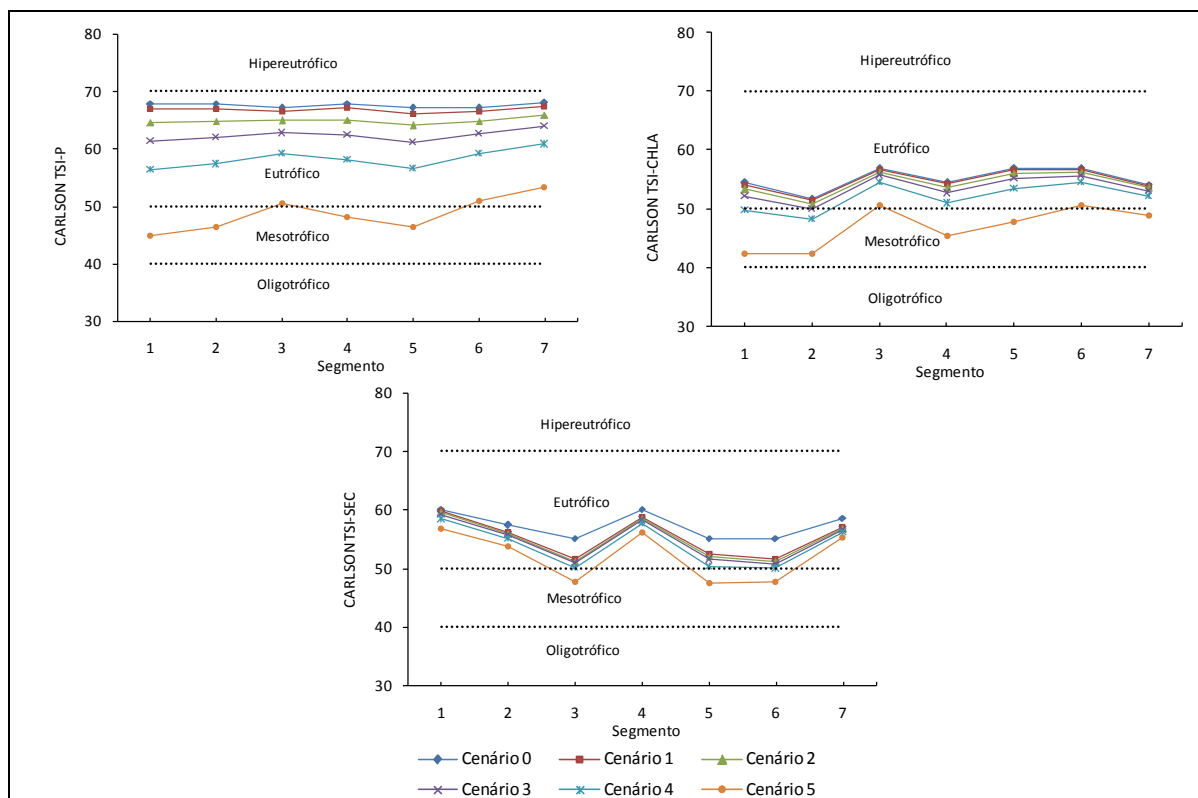


Figura 2: Resultado da simulação dos cenários de intervenção para IET de Carlson

Após a etapa de calibração, os resultados indicam aderência dos valores simulados aos preditos, exceção da transparência onde observa-se uma ligeira tendência de superestimar os valores a partir do segmento S2. Todavia o modelo BATHTUB foi capaz de simular com robustez o comportamento das variáveis que governam o estado trófico do reservatório (Figura 3).

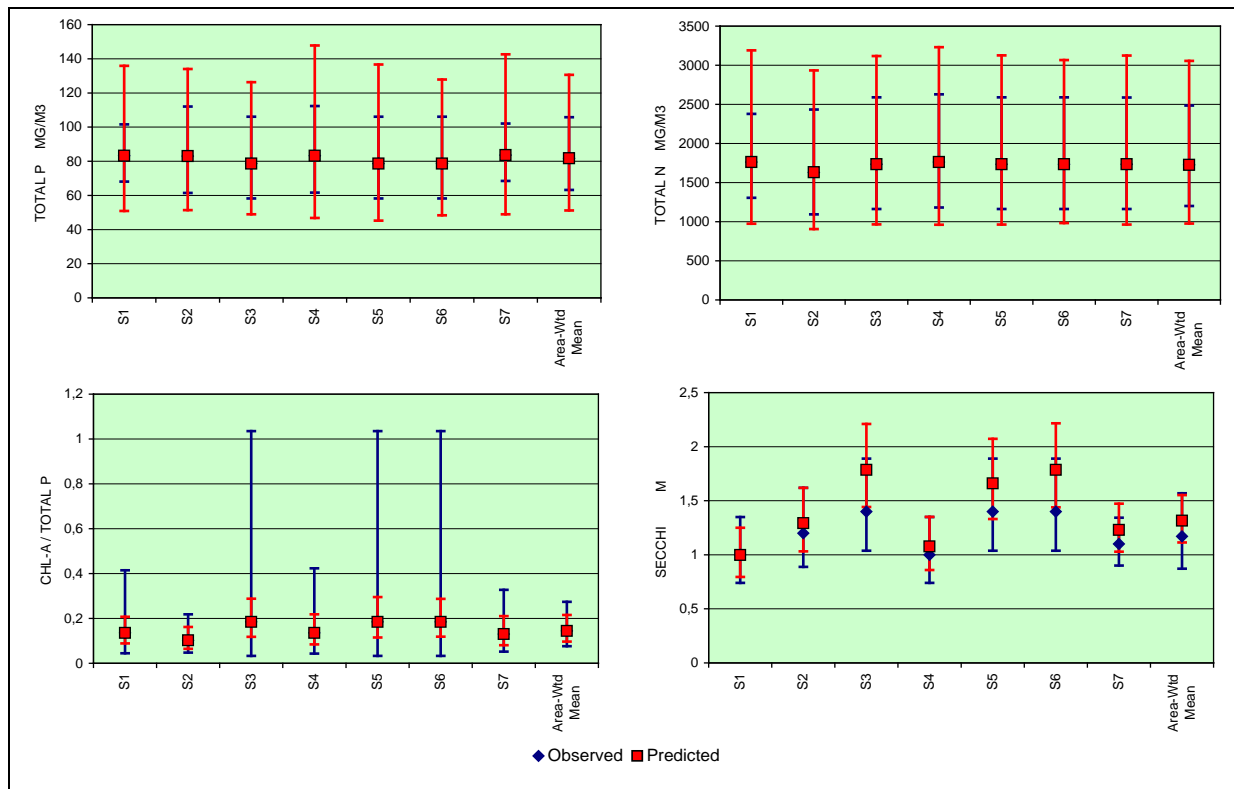


Figura 3: Resultado da simulação após a etapa de calibração do modelo BATHTUB

CONCLUSÕES

A situação atual revela o estágio de degradação da qualidade da água através da constatação dos elevados níveis de fósforo no ambiente advinda das práticas de uso e ocupação do solo da bacia do rio Paraíba.

A reciclagem interna de fósforo no manancial também pode ser considerada como uma causa da elevação da concentração de fósforo na água, visto que em situações de anóxia, o fósforo do sedimento retorna à coluna de água.

Predominantemente, o reservatório apresenta estado eutrófico, caracterizado como limite inferior de eutrofia clássica, diminuição da transparência da água, anóxia durante o verão da camada de hipolímnio e problemas de surgimento de macrófitas.

O modelo BATHTUB conseguiu agregar de forma satisfatória os dados de entrada, que são de distintas naturezas como: qualidade de água, morfologia do reservatório, hidrologia e uso e ocupação do solo na bacia. A calibração com as informações regionais resultou num bom ajuste entre as séries previstas e as observadas.

Os cenários hipotéticos de simulação traçados demonstram a necessidade precípua de ações de curto, médio e longo prazo que visem a redução do aporte de nutrientes na bacia de contribuição do reservatório Epitácio Pessoa e consequentemente, o atendimento aos padrões ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BERGMAN, E. changes in the nutrient load and lake water chemistry in lake Ringsjoin, Southern Sweden from 1966-1996. *Hydrobiologia*. n. 404, p. 9-18, 1999.
2. CANFIELD, D. E.; BACHMANN, R. W. Prediction of total phosphorus concentrations, chlorophyll a, and Secchi depths in natural and artificial lakes. *Can J Fish Aquat Sci* v. 38, p. 414-423, 1981.
3. CARLSON, R.E. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography*, n. 2, vol. 22, p.361-369, 1977.
4. CHAPRA, S. C. Comment on 'An empirical method of estimating the retention of phosphorus in lakes' by W. B. Kirchner and P. J. Dillon. *Water Resour Res*. n. 11, p.1033-1034, 1975.
5. CHAPRA, S. C. Surface water quality modeling. New York: McGraw-Hill, 1997.
6. DILLON P. J.; RIGLER, F. H. The phosphorus-chlorophyll relationships in lakes. *Limnol Oceanogr.*, n. 19 p. 767-773, 1974.
7. EPA. Water Quality Models. Disponível em <<http://water.epa.gov/scitech/datait/models/index.cfm>> Acesso em: 12 de julho de 2012.
8. HARPER, D. Eutrophication of freshwaters: principles, problems and restoration. Chapman & Hall, London, 1992.
9. LARSEN, D. P.; MERCIER, H. T. Phosphorus retention capacity of lakes. *J Fish Res Board Can.* n.33, p. 1742-1750, 1976.
10. LEWIS, W. Precipitation chemistry and nutrient loading by precipitation in a tropical watershed. *V.* 17, n.01, p. 169-181, 1981.
11. PARAIBA. Levantamento Batimétrico do açude Epitácio Pessoa. Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e Minerais. Campina Grande: Governo do Estado da Paraíba, 2004.
12. US ARMY. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Environmental Laboratory. Disponível em <<http://el.erdc.usace.army.mil/products.cfm?Topic=model&Type=watqual>> Acesso em: 05 de junho de 2012.
13. VOLLENWEIDER, R. A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept. *Aquat Sci*, n. 37, p. 53-84, 1975.
14. VOLLENWEIDER, R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD, Paris. Tech. Rpt. DA 5/SCI/68.27, 1968.
15. WALKER, W. W. Simplified procedures for eutrophication assessment and prediction: User Manual Instruction Report W -96-2. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. 1999.