

APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO CONCENTRADO NO ESTUDO DE QUALIDADE DE ÁGUA EM RESERVATÓRIOS DE REGIÕES SEMIÁRIDAS

Juliana Alencar Firmo de Araújo¹; Raquel Jucá de Moraes Sales² & Raimundo Oliveira de Souza³

RESUMO – Nas regiões do semiárido a presença de reservatórios se faz necessária, tendo em vista a grande irregularidade dos processos hidrológicos, tanto do ponto de vista de espaço como de tempo. Como é do conhecimento de todos, as precipitações nesta região ocorrem, de forma concentrada, nos meses de março até junho, fazendo assim, com que haja a necessidade do armazenamento deste recurso para atender a sociedade no resto do ano. Por outro lado, a construção de reservatórios é de grande importância para a garantia de água ao longo dos períodos de estiagem, porém trás alguns problemas do ponto de vista de qualidade de suas águas. Um dos maiores problemas que os engenheiros e técnicos têm que enfrentar, em decorrência do grande período de armazenamento, é o desenvolvimento da eutrofização. Este trabalho aplica um modelo matemático, baseado no balanço de massas de fósforo para procurar verificar o comportamento de suas concentrações no interior dos reservatórios para vários cenários de observação. Para tal, um programa computacional, em linguagem Fortran, foi desenvolvido de modo que várias simulações pudessem ser desenvolvidas. Os resultados mostraram que esta metodologia é uma das mais práticas e eficientes nas questões de análise de problemas desta natureza.

ABSTRACT – In regions of the semi-arid the presence of reservoirs is necessary, in view of the great irregularity of hydrological processes, both in terms of space and time. As one is aware of all the rainfall in this region occur in concentrated form in the months of March through June, making thus that there is a need for storage of this resource, to serve the society in the rest of the year. On the other hand, the construction of reservoirs is of great importance to guarantee water throughout the drought periods; otherwise it brings some problems, from the standpoint of quality of its waters. One of the most important problems that engineers and technicians have to face as a result of this storage is the development of eutrophication. This work applies a mathematical model based on mass balance of phosphorus to seek to verify the behavior of their concentrations within the reservoir, for various scenarios of observation. In such way, a computer program was developed so that multiple simulations can be developed. The results showed that this methodology is still one of the most efficient and practical issues in analyzing problems of this nature.

Palavras-Chave: Qualidade de água; Eutrofização; Modelo matemático.

-
- 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;
 - 3) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil, CEP 60445-760, Fone: (85) 3366.9771, e-mail: rsouza@ufc.br.

1 INTRODUÇÃO

A presença de reservatórios nas regiões semiáridas é de extrema necessidade tendo em vista a grande irregularidade dos processos hidrológicos no ponto de vista espacial e temporal. Por outro lado, os processos de armazenamento têm a inconveniência de tornar o corpo hídrico susceptível a vários processos de natureza física, química e biológica, o que acarreta em sérios problemas no que diz respeito à qualidade de água.

Os reservatórios das regiões semiáridas, além de sofrerem os impactos causados pela própria natureza do regime climático, caracterizado pela irregularidade das precipitações no tempo e no espaço, alto poder evaporante e altas taxas de insolação durante a maior parte do ano, contribuindo decisivamente para o processo de salinização gradual, vêm sofrendo com os impactos resultantes das diversas atividades desenvolvidas ao longo de suas bacias hidrográficas, além daqueles decorrentes de uso e ocupação do solo destas áreas sem planejamento prévio (FREIRE, 2000).

Do ponto de vista químico e biológico, é importante mencionar as mudanças, ao longo do tempo, que o reservatório sofre, provocado pelo aporte de nutrientes por tributários, por escoamento superficial e pelas águas de chuvas. A introdução desses nutrientes provoca o desenvolvimento de uma cadeia de reações fortemente dependente da estrutura térmica do reservatório. Este processo é chamado de eutrofização (VON SPERLING, 1996).

No desenvolvimento da eutrofização, fenômeno típico em reservatórios, o tempo de residência da água em seu interior é muito grande, tornando sua qualidade vulnerável decorrente da presença de grandes concentrações de nutrientes. Os reservatórios são sistemas lênticos, sendo extremamente vulneráveis a processos de contaminação.

Os fitoplânctons, normalmente presentes na água, dependem dos nutrientes e da luz solar para sua sobrevivência. Quando se introduzem elevadas quantidades de nutrientes em um reservatório de água, oriundo de esgotos domésticos, industriais ou de fertilizantes, há um crescimento das populações de algas e de outras plantas, o que pode resultar na proliferação excessiva de algas causando: sabor e odor, toxidez, turbidez e cor, massa de matéria orgânica, cuja decomposição resulta na redução do oxigênio dissolvido da água com impactos sobre a vida aquática, aderência às paredes dos reservatórios e tubulações (lodo), corrosão, prejuízos ao tratamento da água (MOTA, 1997).

Um dos maiores problemas do estudo de eutrofização é a determinação do elemento limitante. Na maioria dos sistemas aquáticos é o fósforo o nutriente limitante. Isso pode ser confirmado pela existência da relação nítida entre concentração de fósforo e características da produtividade dos ambientes aquáticos.

Nutriente limitante é aquele que, sendo essencial para uma determinada população, limita seu crescimento. Em baixas concentrações do nutriente limitante o crescimento populacional é baixo. Com a elevação da concentração do nutriente limitante o crescimento populacional também aumenta. Essa situação persiste até o ponto em que a concentração desse nutriente passa a ser tão elevada no meio, que outro nutriente passa a ser o novo nutriente limitante, pois de nada adianta aumentar a concentração do primeiro nutriente que a população não crescerá, pois estará limitada pela insuficiência do novo nutriente (VON SPERLING, 1996).

É de grande importância conhecer com antecipação que tipos e magnitudes de impactos ambientais podem ocorrer em determinados locais, em função do despejo de cargas poluidoras em ambientes aquáticos. Neste ponto de vista, a modelagem matemática computacional é uma importante ferramenta no gerenciamento dos recursos hídricos, na análise da qualidade da água através do comportamento hidrodinâmico e biogeoquímico do poluente, no processo de diluição de um efluente e no aperfeiçoamento do projeto de estações de tratamento (FORTIS, 2005).

Os modelos matemáticos possibilitam evidenciar, de forma simplificada, as complexas inter-relações entre os vários componentes de um ecossistema aquático possibilitando a realização de previsões sobre a evolução destes ecossistemas e o seu manejo. Esses modelos facilitam o entendimento da dinâmica dos reservatórios busca soluções que minimizem os impactos causados pelos vários tipos de usos dos recursos hídricos.

Atualmente, existem vários tipos de modelos disponíveis para estudos de qualidade de água em reservatórios. Os modelos tridimensionais apresentam ótimos resultados, porém seus custos são elevados e o banco de dados requerido é extenso. Para uma primeira análise, com vista na tomada de decisões, os modelos concentrados desempenham um importante papel tendo em vista que, além da facilidade operacional, não exigem banco de dados tão expressivos.

Esse artigo tem como objetivo desenvolver uma metodologia, por meio de uma modelagem matemática, capaz de estudar de que forma altas taxas de evaporação e altas taxas de lançamentos de esgotos domésticos afetam o comportamento da concentração de fósforo, principal nutriente causador do processo de eutrofização, em um reservatório. O estudo prevê o desenvolvimento de um programa computacional que permite simular para diversos cenários, o comportamento da concentração de fósforo no interior de um reservatório.

2 METODOLOGIA

As condições de qualidade da água de um reservatório dependem dos fatores externos e internos ao seu meio. Os fatores externos são as entradas de fluxos, concentrações de nutrientes e outros componentes presentes nos tributários, como as condições climáticas e, a contribuição de precipitação em volume e qualidade de suas águas. As condições internas são formadas pelas interações físicas, químicas e biológicas do meio.

Para conseguir os objetivos deste estudo houve a necessidade de se definir um modelo matemático que simulasse o comportamento das concentrações de fósforo em um reservatório, sob as ações de diferentes cenários climáticos e de lançamentos de efluentes no mesmo. Nestas condições, o modelo escolhido utiliza o Princípio da Conservação das Massas, aplicado tanto para o fluxo hidrológico como para o fluxo de massa de fósforo no interior do reservatório.

A distribuição de concentração de fósforo no reservatório foi considerada uniforme, o que caracteriza um modelo bem misturado ou modelo concentrado. Com isso, o reservatório é destituído de qualquer estratificação, tanto na vertical como na horizontal. Esta consideração é justificada através da presença das forças de cisalhamento dos ventos na superfície do reservatório. Este elemento físico produz uma mistura completa em uma boa parte do corpo hídrico, fazendo assim, com que não haja estratificação térmica no mesmo. Mas, esta consideração não deve ser aplicada em casos de reservatórios com altas profundidades.

O modelo do reservatório desenvolvido é baseado em um orçamento hidrológico aproximado, mediante o conjunto de equações (ver Figura 1):

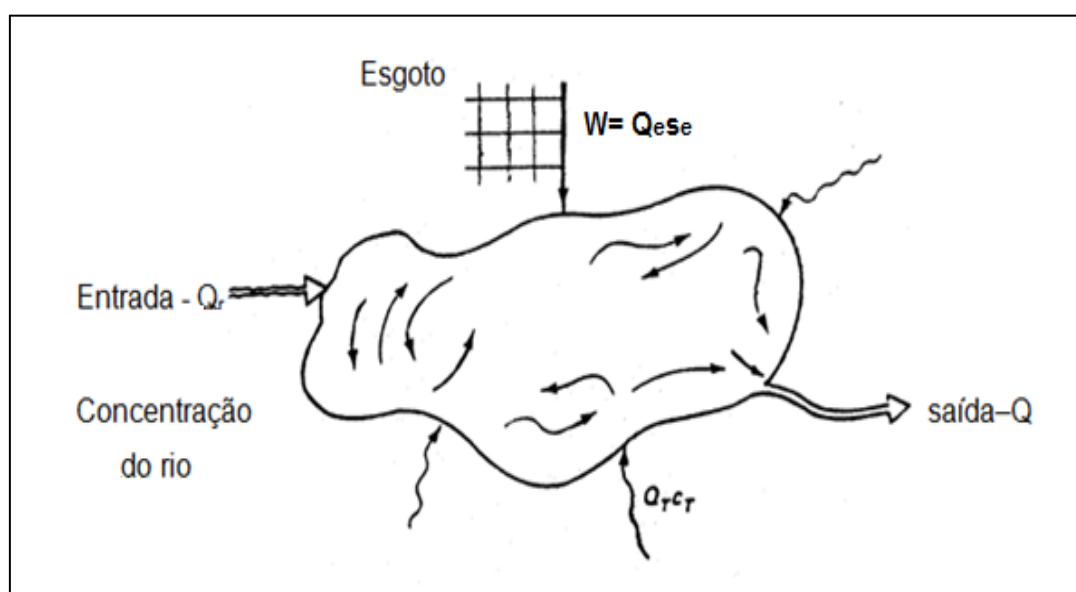


Figura 1 – Vista superior de um reservatório.
Fonte: Thomann (1987).

Neste caso, a equação da continuidade para o meio fluido é a seguinte:

$$\frac{dV}{dt} = I - Q - Ev + q \quad (1)$$

Onde:

$V =$ Volume [L^3];

$I =$ Vazão de entrada [L^3/T];

$Q =$ Vazão regularizada [L^3/T];

$Ev =$ Perda por evaporação [L^3/T];

$q =$ Vazão de carga direta no reservatório [L^3/T];

$t =$ Tempo [T].

Para um meio concentrado, como o reservatório, a equação do transporte fica:

$$\frac{d(VC)}{dt} = q C_e + I C_i - Q C - K_s V C \quad (2)$$

Onde:

$C_e =$ Concentração da carga direta [M/L^3];

$C_i =$ Concentração do afluente [M/L^3];

$C =$ Concentração de fósforo no reservatório [M/L^3];

$K_s =$ Proporção de redução da substância por sedimentação [T^{-1}].

A equação (2) pode ser desenvolvida para:

$$C \frac{dV}{dt} + V \frac{dC}{dt} = q C_e + I C_i - Q C - K_s V C \quad (3)$$

Substituindo a equação (1) na equação (3) resulta:

$$V \frac{dC}{dt} = q(C_e - C) + I(C_i - C) - K_s V C \quad (4)$$

Esta equação diferencial pode ser transformada para:

$$\frac{dC}{dt} + \frac{(I + q + K_s V)}{V} C = \frac{(q C_e + I C_i)}{V} \quad (5)$$

Considerando que W e m são constantes ao longo do processo e considerando as condições iniciais, onde $C = C_0$ para $t = 0$, temos:

$$C(t) = \frac{W}{m} (1 - e^{-mt}) + C_0 e^{-mt} \quad (6)$$

Onde:

$$m = \frac{(I + q + K_s V)}{V} \quad (7)$$

E,

$$W = \frac{(q C_e + I C_i)}{V} \quad (8)$$

Esses modelos concentrados são amplamente aplicados para uma primeira avaliação dos processos de eutrofização em reservatórios.

Uma aplicação da equação (6) foi efetuada por Vollenweider (1968), que desenvolveu o modelo empírico mais conhecido mundialmente, considerando um lago como um sistema concentrado e aplicando a equação de balanço de fósforo total.

$$V \frac{dP}{dt} = W - K_s V P - Q P \quad (9)$$

Integrando e resolvendo a expressão (9), encontra-se:

$$P = \frac{W}{m} (1 - e^{-mt}) + P_0 e^{-mt} \quad (10)$$

Onde:

$$m = \frac{Q}{V} + K_s \quad (11)$$

Ou,

$$m = \frac{1}{t_s} + K_s \quad (12)$$

Sendo:

$$t_s = \frac{\text{Volume Total (V)}}{\text{Vazão de saída}} \quad (13)$$

E,

$$V = V_0 + (I - Q - Ev) \quad (14)$$

Onde:

W = Carga de fósforo sendo lançada no reservatório;

P = Quantidade de fósforo final – meta a ser atingida;

t = Tempo para atingir esta meta de diminuição de fósforo no reservatório;

P_0 = Quantidade de fósforo inicial no reservatório;

t_s = Tempo de detenção hidráulica;

K_s = Taxa de decaimento por sedimentação;
 Q = Volume que sai do reservatório;
 Ev = Volume que o reservatório perde por evaporação;
 I = Volume que entra no reservatório;
 V_0 = Volume inicial do reservatório;
 V = Volume final do reservatório.

Neste estudo, foram considerados alguns dados relevantes para a modelagem, que são dados hipotéticos, tendo em vista que o estudo não tem como objetivo quantificar a carga de fósforo em um determinado reservatório, mas somente verificar o comportamento das concentrações deste nutriente sob algumas condições extremas. Assim, a capacidade do reservatório, em volume mensal é de 40 m³/s; o volume inicial para uma referência de um mês é de 20 m³/s; a vazão regularizada é de 10 m³/s. É importante observar que o volume final de janeiro será o V_0 (volume inicial) de fevereiro, e assim sucessivamente.

Para o cálculo das concentrações, todas as unidades foram transformadas para m³/s. Ainda, para o cálculo do decaimento foram analisadas as formulações sugeridas por Von Sperling (1996):

$$K_s = \frac{10}{H} \quad (15)$$

E,

$$K_s = \frac{2}{\sqrt{t_s}} \quad (16)$$

Onde:

H = Profundidade média do reservatório;

t_s = Tempo de detenção hidráulica.

Tendo em vista que o estudo é hipotético foram consideradas para as condições de entrada de água no reservatório, de entrada de carga de fósforo no reservatório e para o processo de evaporação, funções senoidais, que descrevem, aproximadamente, os efeitos destes processos durante um ano de observação. Com isso tem-se:

$$I = Q_i(1 + Q_e \sin(n\pi t)) \quad (17)$$

$$Ev = Q_v(1 - Q_{ev} \sin(n\pi t)) \quad (18)$$

$$C_i = C_e(1 + C C_e \sin(n\pi t)) \quad (19)$$

Onde estes símbolos já foram previamente definidos.

Finalmente, para realizar as simulações para diferentes cenários de observação, foi desenvolvido um programa computacional, em linguagem Fortran, de forma que os resultados fossem obtidos. Este programa simula o comportamento das concentrações de fósforo, dentro de um cenário severo de evaporação, um cenário severo de lançamentos de efluentes ou uma combinação de várias mudanças na entrada do reservatório.

3 RESULTADOS

O estudo verificou, através de um programa computacional, o comportamento da concentração de fósforo em um reservatório com altas taxas de evaporação para diferentes cenários. Desta forma, um conjunto de simulações foi realizado considerando um reservatório com capacidade mensal de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, volume inicial mensal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ e vazão regularizada de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os dados de entrada da vazão e da concentração de fósforo foram representados por funções senoidais que melhor representam o comportamento dessas variáveis durante um ano de observação. Igualmente a evaporação foi considerada uma função senoidal invertida que representa o fato de que nos meses de julho, agosto e setembro ocorrem as maiores taxas de evaporação.

A seguir serão apresentados os resultados para os diferentes cenários propostos.

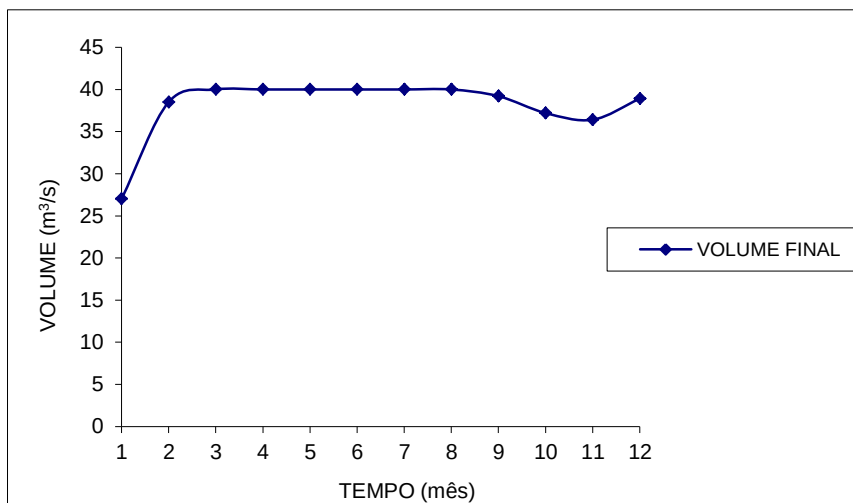


Figura 2 – Comportamento do volume de água armazenado no reservatório em cada mês.

A Figura 2 mostra o comportamento do volume do reservatório durante o ano de simulação. Através do gráfico pode-se observar que ele atinge a cota máxima durante 6 meses do ano (março a julho), mostrando, assim, que nesse período houve sangria através dos vertedouros do reservatório. A figura mostra, ainda, que para este ano de simulação houve um ano bastante chuvoso.

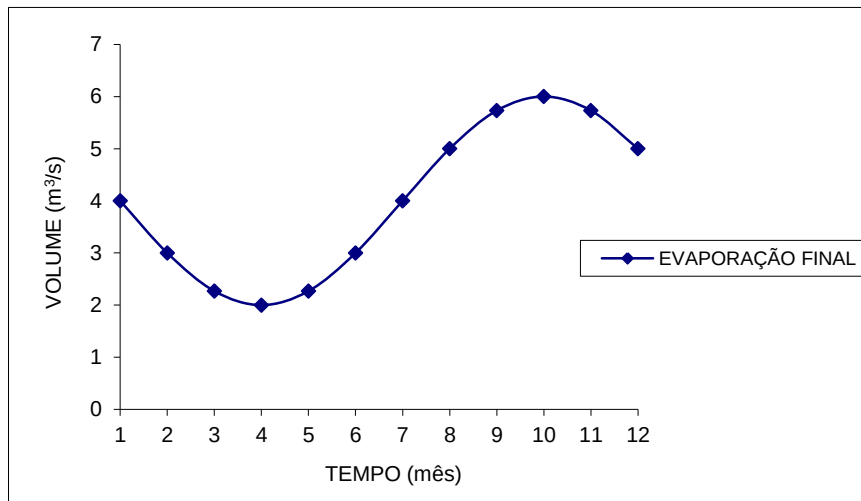


Figura 3 - Comportamento da evaporação em cada mês de observação.

A Figura 3 mostra o comportamento da evaporação no período considerado. O gráfico mostra que foram considerados uma taxa mínima de evaporação de 2 m³/s e uma taxa máxima de 6 m³/s, valores bastante razoáveis para a climatologia do semiárido.

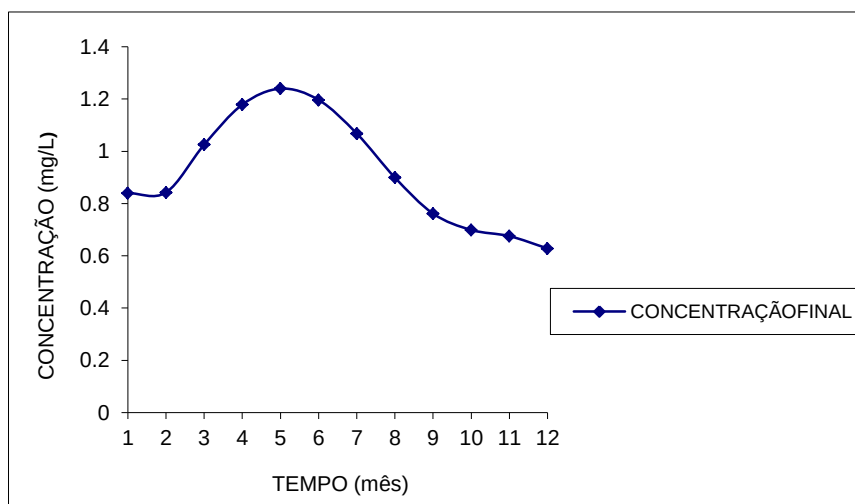


Figura 4 – Comportamento da concentração de fósforo no reservatório em cada mês.

A Figura 4 mostra o comportamento da concentração de fósforo no reservatório para este cenário apresentado. Através do gráfico pode-se verificar que a concentração tem um pico de aproximadamente 1,2 mg/L no mês de maio depois caindo sistematicamente até um mínimo de 0,6 mg/L em dezembro. Para esta simulação foi considerado que o decaimento do fósforo, que representa a taxa de precipitação desta substância no fundo do reservatório, era igual a 4,0/mês.

É importante notar que a taxa máxima de fósforo ocorre no mês de maio porque representa a maior quantidade de entrada de fósforo no reservatório. Observando o comportamento da vazão de entrada e da concentração de entrada verifica-se que o pico máximo dessas variáveis ocorre no mês de maio, garantindo, assim, uma maior presença de fósforo nesse período.

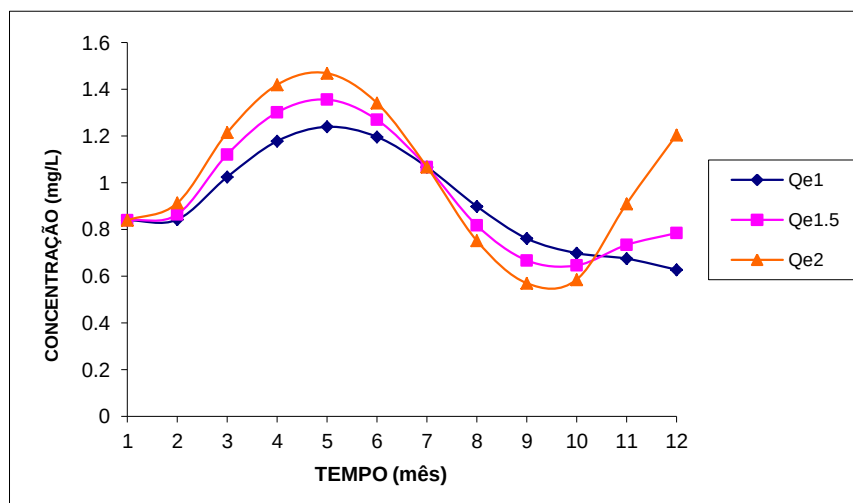


Figura 5 – Concentração para a variação da vazão de entrada do reservatório.

A Figura 5 mostra o comportamento da concentração para diferentes vazões de entrada. Na simulação foram considerados para os parâmetros de entrada os acréscimos de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$, $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ na função senoidal. O gráfico mostra que quanto maior é o volume d'água que entra no reservatório, mantido o mesmo aporte da concentração de fósforo, maior é a concentração de fósforo no reservatório.

Através da Figura 5 verifica-se que os picos de fósforo ocorrem entre $1,2 \text{ mg/L}$, para o caso do parâmetro de entrada ser de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$, e $1,5 \text{ mg/L}$, para o caso do parâmetro de entrada ser de $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Para os últimos meses, verifica-se uma irregularidade no comportamento. Esta irregularidade é causada pela presença do decaimento no modelo.

Como se sabe o estudo é realizado através de um modelo que é alimentado pela massa de fósforo que entra no reservatório pela massa de fósforo que sai do reservatório e pelo decaimento. Quando a massa de fósforo que entra no reservatório é baixa prevalece o decaimento como principal fator atuante no comportamento do fósforo. Isto é observado na curva da figura correspondente ao parâmetro de entrada de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, como o aporte de fósforo é menor prevalece o decaimento fazendo com que a concentração de fósforo caia nos últimos meses do ano.

O mesmo não ocorre para a simulação em que o parâmetro de entrada é de $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, prevalece o aporte de fósforo fazendo com que a concentração de fósforo volte a subir à medida que aumenta a vazão de entrada. Este resultado permite concluir que para reservatórios com grande aporte de fósforo, notadamente aqueles que recebem grandes quantidades de efluentes domésticos e comerciais, tem suas concentrações de fósforo bastante elevadas e ficam expostas ao maior risco de eutrofização. Este cenário de saída está de acordo com as observações de campo.

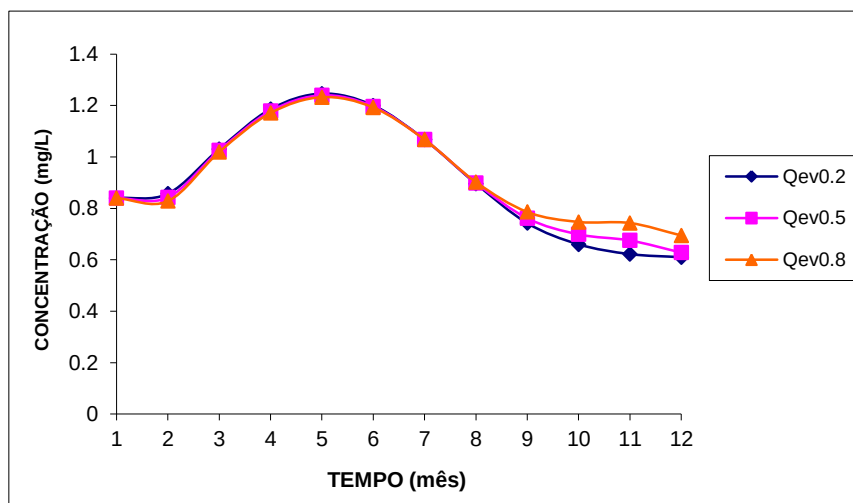


Figura 6 – Concentração para a variação da evaporação no reservatório.

A Figura 6 mostra o comportamento da concentração para uma variação da taxa de evaporação. A simulação mostrou um resultado muito importante. Observa-se que nos primeiros meses quando o volume de água no reservatório é muito grande, a influência da evaporação na concentração de fósforo é insignificante. Isto pode ser observado através do gráfico.

Por outro lado, quando o reservatório tem menos água no seu interior, a influência da evaporação passa a ser relevante. Isto pode ser observado dos meses de agosto a dezembro onde começa a diminuir a quantidade de água no reservatório e a aumentar a taxa de evaporação. Neste caso, quanto maior a evaporação maior será a concentração de fósforo no reservatório, aumentando assim, o risco de eutrofização do mesmo.

Como os reservatórios da região semiárida possuem grandes deficiências dos seus volumes armazenados, conclui-se que para esses casos, o risco de eutrofização é maior, exigindo, assim, um maior controle em suas operações.

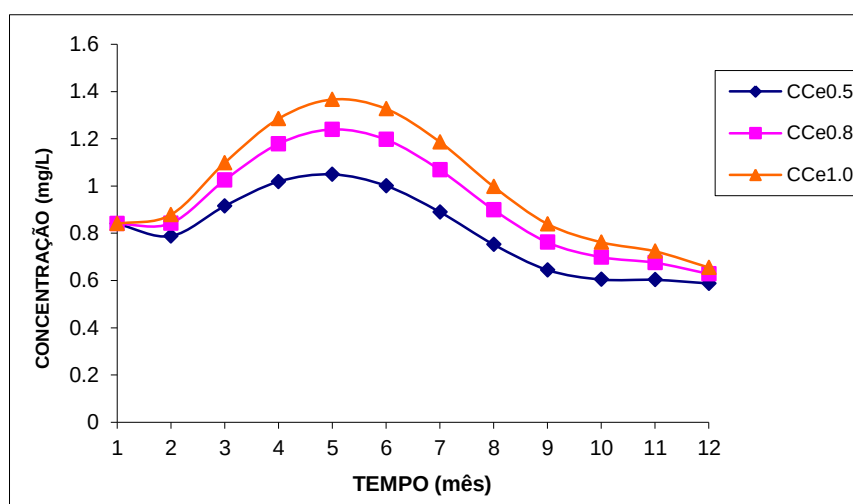


Figura 7 – Concentração para a variação de massa de fósforo que entra no reservatório.

A Figura 7 mostra o comportamento de concentração para diferentes aportes de fósforo no reservatório. Neste caso, o resultado mostra a eficiência do modelo, pois para um aumento da massa de fósforo no reservatório há um aumento sistemático nas concentrações dessa substância no reservatório, confirmando que os reservatórios susceptíveis a grandes quantidades de matéria orgânica são expostos a maiores riscos de eutrofização. Este resultado está de acordo com as observações de campo, o que garante uma boa confiabilidade ao modelo matemático proposto para este estudo.

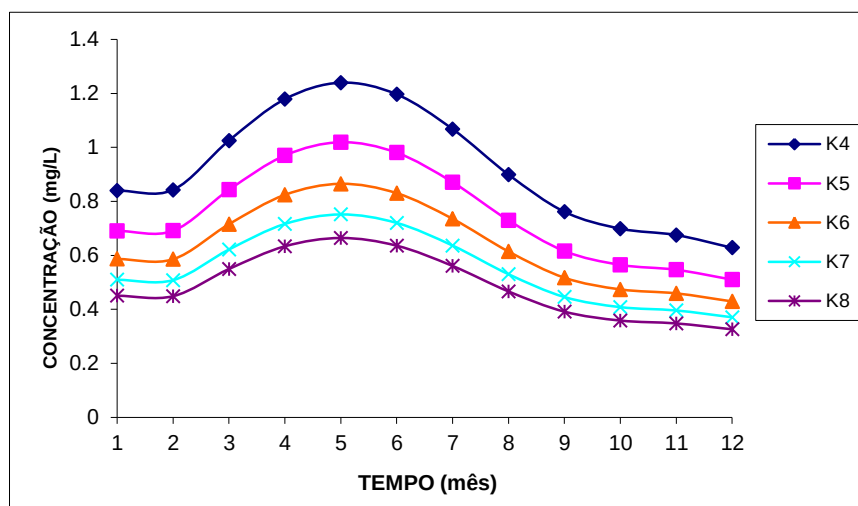


Figura 8 – Concentração de fósforo no reservatório para diferentes decaimentos.

Finalmente a Figura 8 mostra os resultados obtidos para uma simulação para diferentes taxas de decaimento. Como o decaimento do fósforo representa a taxa de precipitação dessa substância no fundo do reservatório, para maiores valores da taxa de decaimento implicam em maiores valores da velocidade de sedimentação. Assim, uma variação de decaimento significa uma variação desta velocidade e, em consequência, significa uma remoção de fósforo do ambiente aquático.

Através da Figura 8 pode-se verificar que quanto maior a taxa de decaimento menor é a concentração de fósforo no reservatório, ou seja, para uma taxa de decaimento igual a 4,0/mês o pico máximo de fósforo ocorre próximo a 1,2 mg/L, enquanto que para uma taxa de decaimento de 8,0/mês o pico máximo ocorre próximo a 0,7 mg/L. Este resultado confirma a eficiência do modelo matemático usado neste estudo, permitindo assim que com algumas simulações se conheça o comportamento das concentrações de fósforo em um reservatório para diferentes cenários de observação.

Vale ressaltar que o estudo se concentrou em analisar o universo de influência de cada variável de controle no comportamento da concentração no interior de um reservatório. Finalmente, deve ficar claro que para o caso de se aplicar esse modelo em um reservatório real o mesmo é capaz de corresponder a todas as expectativas de um estudo dessa natureza.

4 CONCLUSÕES

O modelo matemático com base no balanço de fósforo foi aplicado para estudar o comportamento da concentração de fósforo no interior do reservatório com altas taxas de evaporação. Para tal foi desenvolvido um programa computacional que permitiu que algumas simulações fossem realizadas. Os resultados permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

- A modelagem matemática se apresenta como uma boa metodologia para o estudo da qualidade de água para reservatório, cujo custo é muito baixo e a eficiência é satisfatória.
- Para um cenário de forte aporte de massa de fósforo nos reservatórios, como é o caso do lançamento de efluentes provenientes de zonas urbanas, as concentrações de fósforo crescem rapidamente, expondo, assim, essa massa hídrica a um risco de maior eutrofização, o que exige que tratamentos de efluentes sejam realizados para que as concentrações de fósforo lançadas sejam as menores possíveis.
- Para um cenário de alta evaporação os resultados mostraram que para reservatórios com baixos volumes armazenados essas taxas exercem forte influência nas concentrações no interior do reservatório. Com isso, o resultado mostra que em reservatórios do semiárido, que possuem altas taxas de evaporação, o risco de eutrofização aumenta se medidas não forem tomadas para reduzir o aporte de fósforo no mesmo;
- Finalmente, para uma avaliação da precipitação de fósforo no fundo do reservatório, os estudos mostraram que o comportamento da concentração dessa substância é altamente sensível a estes parâmetros. Assim, quanto maior a velocidade de precipitação do fósforo menor será a concentração do mesmo e menor será o risco de eutrofização.

BIBLIOGRAFIA

FORTIS, R. M. *Modelagem computacional da dispersão da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR – Petrobrás 2005*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FREIRE, R. H. F. *Aspectos limnológicos de três reservatórios que abastecem a região metropolitana de Fortaleza – açudes Pacajus, Pacoti e Gavião*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

MOTA, S. *Introdução à engenharia ambiental*. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

VOLLENWEIDER, R. A. Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication. **Report OECD**, Paris, DAS/CSI/68.27, 165p., 1968.

VON SPERLING, E. Mechanisms of eutrophication in tropical lakes. *Environmental Pollution*, p.434-439, 1996.

VON SPERLING, E. ***Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos***. Belo Horizonte: Editora do Departamento de Engenharia Sanitária, UFMG, 243 p., 1996.

THOMANN, R. V., & MUELLER, J. A. **Principles of Surface Water Quality Modeling and Control**. Harper & Row Publishers, N. York, 1987.

AGRADECIMENTOS

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