

ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOFTWARE PAMOLARE COM VISTAS AO ESTUDO DA QUALIDADE DE ÁGUA EM RESERVATÓRIOS, A PARTIR DA APLICAÇÃO NO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO

Fernando Fernandes de Lima¹ Vanessa Ueta²; Andréa Pereira Cysne³; Carlos Roberto Moura Leal Junior³; Alina de Moraes Bezerra³; Orleani Costa Ramos³ & Raimundo Oliveira de Souza⁴

RESUMO --- A eutrofização é um problema que vem trazendo cada vez maiores preocupações à comunidade científica que se dedica ao estudo dos ecossistemas aquáticos. Há mais de 30 anos que são buscados métodos para melhor entender o desenvolvimento do fenômeno, principalmente por meio da modelagem matemática. Capaz de inviabilizar o uso humano e industrial de um reservatório, a eutrofização deve ser motivo de constante preocupação dos gestores dos recursos hídricos, pois uma vez instalada, o tempo necessário para recuperação de um reservatório é da ordem da dezena de anos. Este trabalho tem como objetivo a aplicação do programa PAMOLARE no reservatório Acarape do Meio, no Estado do Ceará, para estudar o comportamento da qualidade de água no referido reservatório mediante a análise dos seus parâmetros hidráulicos. Os resultados mostraram que o tempo de detenção hidráulica desempenha um importante papel na qualidade da água daquele corpo hídrico.

ABSTRACT --- Eutrophication is a problem that is becoming more important within the scientific community that studies the aquatic ecosystems. Methods for a better understanding of the phenomenon are object of research since the 70's, mostly through mathematical modeling. Being able to impede the human and industrial use of a reservoir, eutrophication must be a reason for a everyday concern of water resources managers, as once it is set up, the time needed for recovery of a reservoir is usually no less than 10 years. This search has as the principal objective to apply the PAMOLARE in the Acarape do Meio Reservoir, in the State of Ceará, to study the behavior of the water quality in the reservoir, through the analysis of its hydraulics parameters. The results showed the detention time plays a very important game in the water quality of that body of water.

Palavras-chave: Eutrofização; Qualidade de Água; Modelos de Qualidade de Água

¹ Engenheiro Civil, M.Sc. em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e Perito Criminal Federal - Departamento de Polícia Federal. fernando_ffl@dpf.gov.br.

² Engenheira Civil, M.Sc. e doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP-60445-760. Bloco 713. Fortaleza - Ceará. vanessa_ueta@yahoo.com.br.

³ Engenheiro Civil, mestrando em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsistas da CAPES e CNPq. Campos do Pici, CEP-60445-760. Bloco 713. Fortaleza - Ceará. andreacysne1@yahoo.com.br, clealjr@hotmail.com, alina_moraes@yahoo.com.br, orleani@uol.com.br.

⁴ Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Campos do Pici, CEP-60445-760. Bloco 713. Fortaleza - Ceará. rsouza@ufc.br

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma disponibilidade hídrica estimada em 11,6% da água doce mundial, distribuída em uma área de 8.514.876,60 km² e uma população de 169.799.170 habitantes (IBGE, 2000). Este valor poderia ser considerado farto, não fosse o descaso com que freqüentemente esse recurso tão importante é tratado. A perigosa combinação de crescimento populacional desordenado e falta de gerenciamento dos recursos hídricos tem reduzido significativamente este potencial hídrico.

A situação do estado do Ceará, contudo, não é tão confortável. São quase 7,5 milhões de habitantes (IBGE, 2000) disputando pouco mais de 17,5 bilhões de metros cúbicos de água reservada (CEARÁ, 2005). Sendo o Ceará um estado encravado no semi-árido (93% de seu território) e, como se este fato não fosse suficiente, com cerca de 75% de seu território assentado sobre o cristalino, é de fundamental importância a conservação da pouca água que lhe cabe (CEARÁ, 2005).

Um dos aspectos mais importantes dessa conservação é a manutenção da qualidade da água. De muito pouco adianta ter água se esta não puder ser utilizada.

Além do Ceará, a eutrofização começa a se transformar num dos principais problemas mundiais de qualidade de água, pois o excesso de biomassa de algas causa variação de níveis de disponibilidade de oxigênio, alterações de sabor e odor, entupimento de filtros, dentre outros problemas (KUO, 2006).

Chorus e Bartram (1999 *apud* SANTOS et al., 2004) informam que 53% dos lagos europeus se encontram eutrofizados, assim como 28% dos africanos, 48% dos norte-americanos e 41% dos sul-americanos. Na Ásia essa proporção chega a 54%.

A eutrofização tem sido extensamente estudada devido à crescente necessidade humana de armazenamento de água para abastecimento. Em particular, o nordeste brasileiro sofre com este problema por uma conjunção de fatores: elevada insolação, falta de destinação e tratamento adequados dos esgotos em grande parte das cidades e extrema dependência de reservatórios de água.

Para melhor entender a eutrofização e procurar maneiras para solucioná-lo, a ciência tem recorrido à modelagem matemática, desenvolvendo em alguns casos técnicas específicas.

A modelagem do fenômeno começou há mais de 30 anos. Basicamente são usadas equações de balanço de massa não transientes (VOLLENWEIDER, 1975 *apud* ARHONDISIS; BRETT, 2005; DILLON; RIGLER, 1974 *apud* ARHONDISIS; BRETT, 2005), as quais procuram prever as concentrações totais de fósforo baseadas nas concentrações iniciais, na retenção nos sedimentos e no tempo de retenção dos lagos. Por sua vez, essas concentrações previstas são utilizadas para prever uma série de outras variáveis, tais como clorofila-a.

A Organização das Nações Unidas (ONU), por meio de seu Centro Internacional de Tecnologia Ambiental (IETC), parte da Divisão de Tecnologia, Indústria e Economia (DTIE) do Programa para o Meio Ambiente (UNEP), desenvolveu o programa computacional PAMOLARE, um acrônimo em inglês para Planejamento e Administração de Lagos e Reservatórios com foco na Eutrofização.

Este trabalho tem como principal objetivo a aplicação de um modelo matemático, PAMOLARE, no reservatório Acarape do Meio, no estado do Ceará, de modo a verificar de que forma as concentrações de fósforo, nitrogênio e clorofila-a são afetadas mediante a alteração de alguns parâmetros hidráulicos do reservatório.

2. METODOLOGIA

A Organização das Nações Unidas, num esforço para auxiliar tomadores de decisão, instituições e profissionais da área de gerenciamento de lagos e reservatórios em processo de eutrofização, conjuntamente com a Universidade de Kyoto, no Japão, desenvolveram um conjunto de modelos matemáticos, apresentados no pacote denominado PAMOLARE. Seu nome é uma sigla de *Planning and Management of Lakes and Reservoirs focusing on Eutrophication*. Trata-se de uma ferramenta que também permite melhor entendimento dos processos de eutrofização, suas origens e efeitos.

O programa computacional possui quatro modelos implementados: a) o gráfico de Vollenweider, b) um modelo para lagos em uma camada com quatro variáveis, c) um modelo para lagos em duas camadas e d) um modelo estruturalmente dinâmico para lagos em duas camadas e uso dos conceitos de energia.

Já existe uma segunda versão que consiste apenas do modelo estruturalmente dinâmico. Contudo, quando os dados disponíveis não são suficientes para gerar este modelo dinâmico, a primeira versão continua sendo usada.

O modelo de uma camada consiste numa combinação de dois tipos de modelos. O primeiro é um modelo dinâmico, derivado do modelo geral de Vollenweider (1975 *apud* JØRGENSEN et al. 2003), acrescido do nitrogênio. O segundo tipo é um conjunto de modelos empíricos, baseados em dados de uma série de lagos.

As equações 1 e 2 regem o modelo de uma camada para o nitrogênio, a primeira fornece a variação da concentração do nitrogênio na água e a segunda a variação da concentração do nitrogênio no sedimento.

$$\frac{dN_{água}}{dt} = \frac{[(N_c - Denit) + N_{liberado} \cdot N_{sed}]}{z} - \left(\frac{1}{T_{res}} \right) \cdot N_{água} \cdot a - \left(\frac{1}{z} \right) Taxa_{sed} \cdot N_{água} \quad (1)$$

$$\frac{dN_{sed}}{dt} = Taxa_{sed} \cdot N_{água} \cdot (1 - N_{imob}) - N_{liberado} \cdot N_{sed} \quad (2)$$

Onde:

- $N_{água}$ é o total de nitrogênio na coluna d'água (mg / l);
- N_c é a taxa de entrada de nitrogênio no lago (g / m.ano);
- $Denit$ é a taxa de desnitrificação (g / m.ano);
- N_{sed} é a concentração de nitrogênio no sedimento (g / m²);
- z é a profundidade média do lago (m);
- T_{res} é o tempo médio de residência da água no lago (ano);
- a é um fator de correção devido à ciclagem da água;
- $Taxa_{sed}$ é a taxa média de sedimentação (m / ano);
- N_{imob} é a razão de nitrogênio sedimentado e imobilizado;
- $N_{liberado}$ é a taxa de liberação de nitrogênio do sedimento (ano⁻¹);

No modelo de uma camada, a desnitrificação é dada pela Equação 3:

$$Denit = N_c - 0,34 \cdot (T_{res})^{0,16} \cdot z^{0,17} \quad (3)$$

A variação da concentração do fósforo na água e no sedimento, para o modelo de uma camada, é fornecida pelas equações 4 e 5 respectivamente:

$$\frac{dP_{água}}{dt} = \frac{[P_c + P_{liberado} \cdot P_{sed}]}{z} - \left(\frac{1}{T_{res}} \right) \cdot P_{água} \cdot a - \left(\frac{1}{z} \right) Taxa_{sed} \cdot P_{água} \quad (4)$$

$$\frac{dP_{sed}}{dt} = Taxa_{sed} \cdot P_{água} \cdot (1 - P_{imob}) - P_{liberado} \cdot P_{sed} \quad (5)$$

Onde:

- $P_{água}$ é o total de fósforo na coluna d'água(mg / l);
- P_c é a taxa de entrada de fósforo no lago (g / m.ano);
- P_{sed} é a quantidade de fósforo no sedimento (g / m²);
- z é a profundidade média do lago;
- T_{res} é o tempo médio de residência da água no lago (ano);
- a é um fator de correção devido à formação das termoclinas;

- $Taxa_{sed}$ é a taxa média de sedimentação (m / ano);
- P_{imob} é a razão de fósforo sedimentado e imobilizado;
- $P_{liberado}$ é a taxa de liberação de fósforo do sedimento (ano⁻¹);

Já os modelos empíricos para clorofila e zooplâncton foram obtidos de regressões estatísticas (EDMONDSEN, 1986 *apud* JØRGENSEN et al. 2003), aqui apenas transcritos os resultados (P_t representa a concentração total de fósforo):

- Clorofila (mg / l) = 0,000073 .(1000 P_t)^{1,4};
- Zooplâncton (mg / l) = 0,038 . (1000 P_t)^{0,64};

O açude Acarape do Meio é composto por uma barragem de gravidade, construída em concreto, com localização geográfica nas coordenadas 523.593 E e 9.536.618 N, situado no município de Redenção no estado do Ceará. O Açude, que barra o rio Pacoti, possui capacidade de armazenamento de 31,5 milhões de m³, bacia hidráulica de 220 hectares e hidrográfica de 197.130 km². A extensão do coroamento é de 267m com largura medindo 3,0m. A cota do coroamento é 133,0m e sua altura máxima, 33,0m. Possui um vertedouro com largura de 60m e lâmina máxima de 1,7m, sendo a cota da soleira 130,0m, com tomada d'água do tipo galeria (CEARÁ, 2007).

O açude faz parte do sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza e é o responsável pelo abastecimento de água bruta do Distrito Industrial de Maracanaú e das cidades de Pacatuba, Guaiúba, Maranguape, Redenção, Acarape, Barreira e do distrito de Antônio Diogo, além da perenização do vale entre os municípios de Redenção e Acarape (CEARÁ, 2001).

Sua bacia hidrográfica engloba os municípios de Baturité, Guaiúba, Guaramiranga, Mulungu, Pacoti, Palmácia e Redenção.

3. RESULTADOS

Visando uma melhoria dos prognósticos, foi realizada uma análise da sensibilidade do modelo aos seus diversos parâmetros. Para isso foram feitas simulações do comportamento do nitrogênio e fósforo, tanto dissolvidos na água como na forma de sedimento.

O horizonte de tempo utilizado em todas as simulações foi de 5 anos. Em cada simulação os demais parâmetros do modelo matemático foram mantidos constantes.

3.1 Sensibilidade quanto ao tempo de residência da água

O tempo de residência do Acarape do Meio foi de aproximadamente 105 dias em 2002 e 110 dias em 2003 (CEARÁ, 2002b). Assim, adotou-se como base para esta análise o valor $Tr = 0,288$ ano (105 dias). Partindo deste valor, foram ainda estudados três cenários: $Tr = 0,144$ ano; $Tr = 0,072$ ano e $Tr = 0,576$ ano.

Verifica-se a elevada correlação entre o tempo de residência e as concentrações observadas. A relação é quase que linear, com as concentrações caindo ou subindo na mesma proporção em que o tempo de residência. Desta forma, torna-se muito importante acompanhar com precisão o tempo de residência do reservatório. Os referidos cenários podem ser observados nas figuras de 1 a 4.

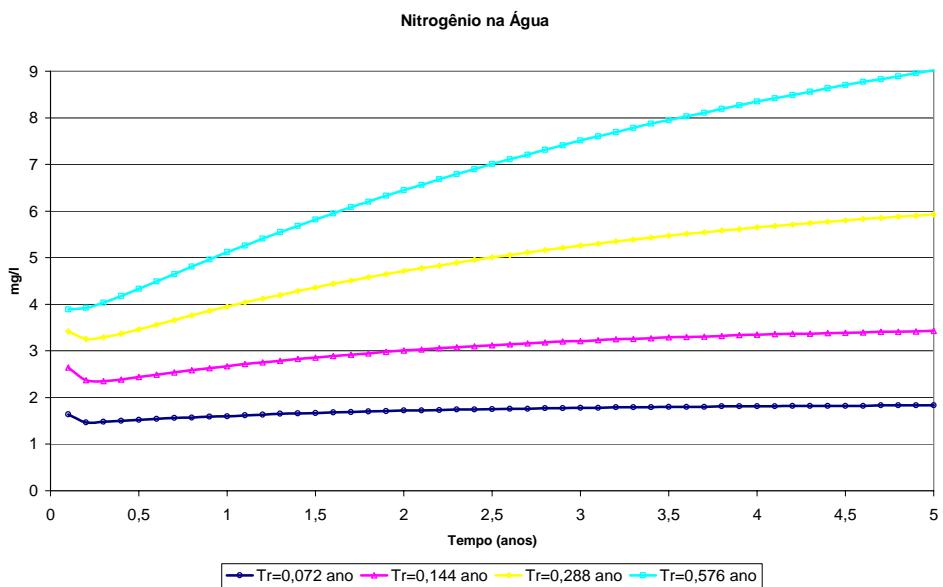


Figura 1 – Variação do nitrogênio dissolvido na água de acordo com o tempo de residência

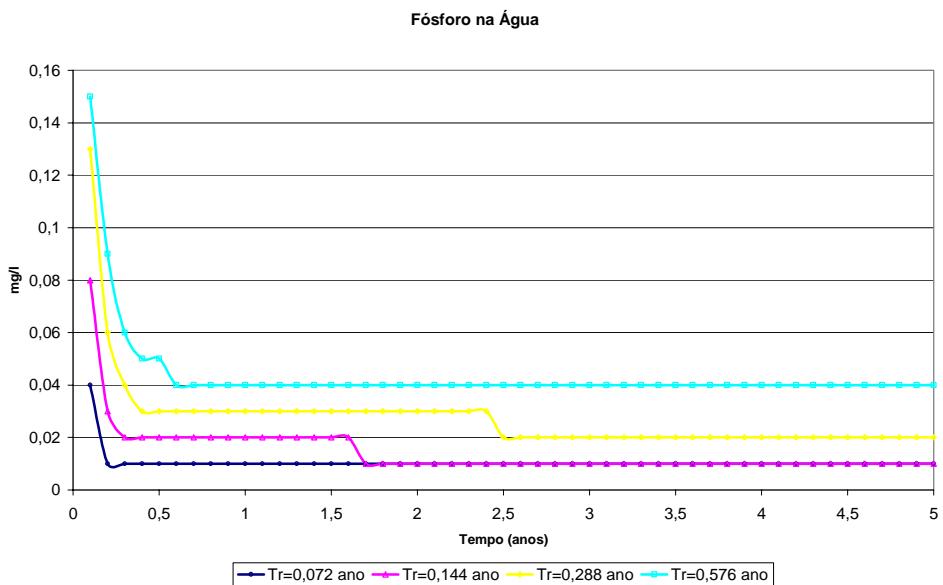


Figura 2 – Variação do fósforo dissolvido na água de acordo com o tempo de residência

A Figura 1 apresenta-se o resultado das simulações para a concentração de nitrogênio na água. Através da figura verifica-se que, como era de se esperar, a concentração de nitrogênio aumenta de forma considerável com o aumento do tempo de residência da água. Entretanto, para tempos de residência menores o processo tende a se estabilizar mais cedo, o que não ocorre quando o tempo de residência é igual a 0,576 anos onde a concentração de nitrogênio continua crescendo para o tempo simulado.

Com relação à Figura 2 que mostra o comportamento de fósforo na água para diferentes tempos de residência, verifica-se que como no caso do nitrogênio, a concentração do fósforo aumenta com o aumento do tempo de residência da água. Por outro lado, os resultados mostram que, pelo menos de forma aparente, o sistema se estabilizou mais rapidamente, como ilustração verifica-se que as concentrações de fósforo se estabilizam em 1 ano após o início da observação, o que não ocorre para o caso do nitrogênio.

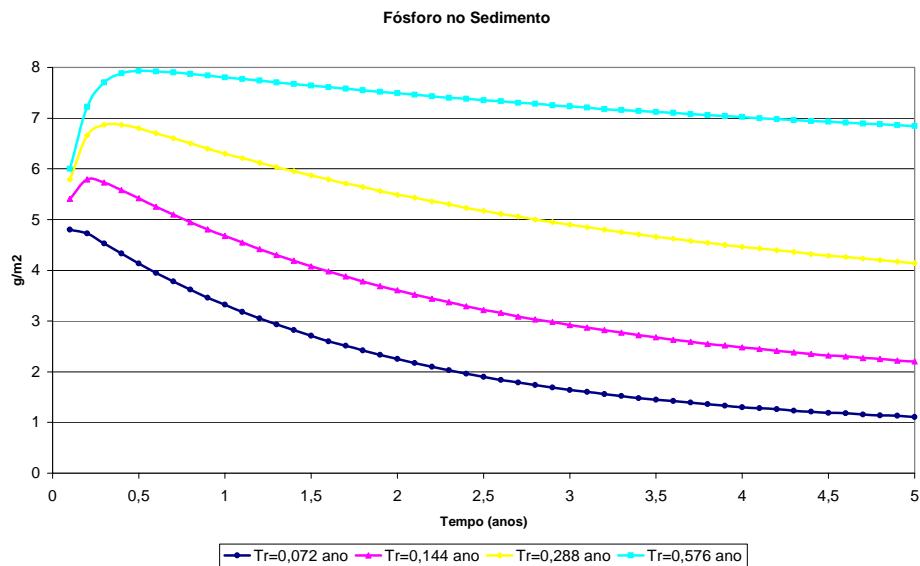


Figura 3 – Variação do fósforo sedimentado de acordo com o tempo de residência

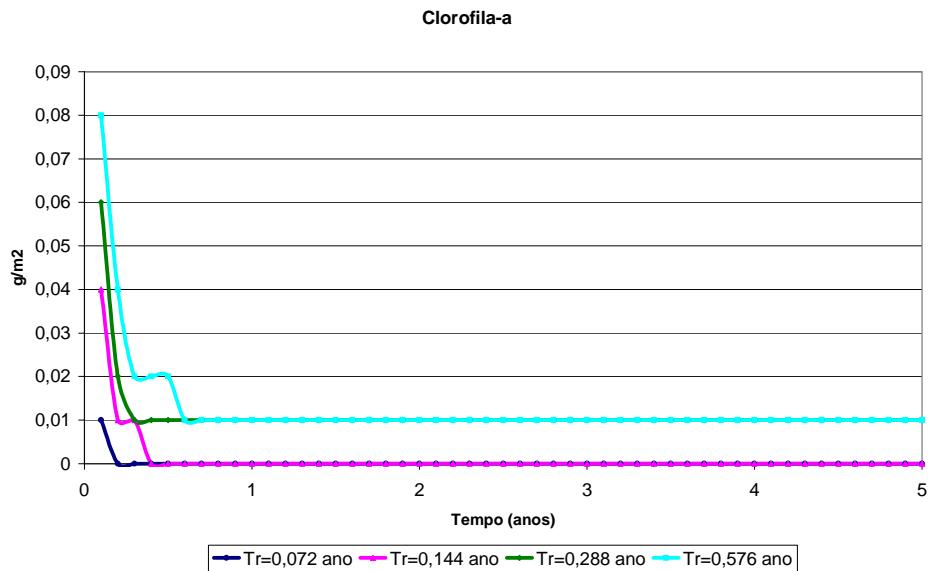


Figura 4 – Variação da concentração da clorofila-a de acordo com o tempo de residência

Uma outra observação importante diz respeito ao fósforo sedimentado, Figura 3. Os resultados da simulação mostram que quanto maior o tempo de residência da água maior a concentração de fósforo sedimentado. Por outro lado, os resultados mostram que a taxa de sedimentação diminui com o tempo tendendo a se estabilizar após um tempo de observação, o que comprova ser o tempo de residência da água um importante parâmetro na análise da qualidade da água em um reservatório. Este mesmo resultado pode ser observado quando o nutriente estudado for a clorofila-a. Entretanto, deve-se lembrar que a clorofila-a é uma variável que depende de outros fatores presentes na água.

3.2 Sensibilidade quanto à taxa de sedimentação

A taxa de sedimentação adotada inicialmente foi de 150 m/ano. Foram então analisados dois outros cenários: 200 m/ano e 100 m/ano.

Nas figuras 5 e 6 verifica-se a pouca influência da taxa de sedimentação na concentração do nitrogênio na água, pois um aumento de 100% na taxa provoca uma redução de aproximadamente 10% nas concentrações daquele nutriente, o mesmo acontecendo para o fósforo.

Assim, é possível afirmar que é possível continuar a fazer as estimativas da taxa de sedimentação de forma expedita, sem prejudicar sobremaneira os prognósticos relativos ao Acarape do Meio.

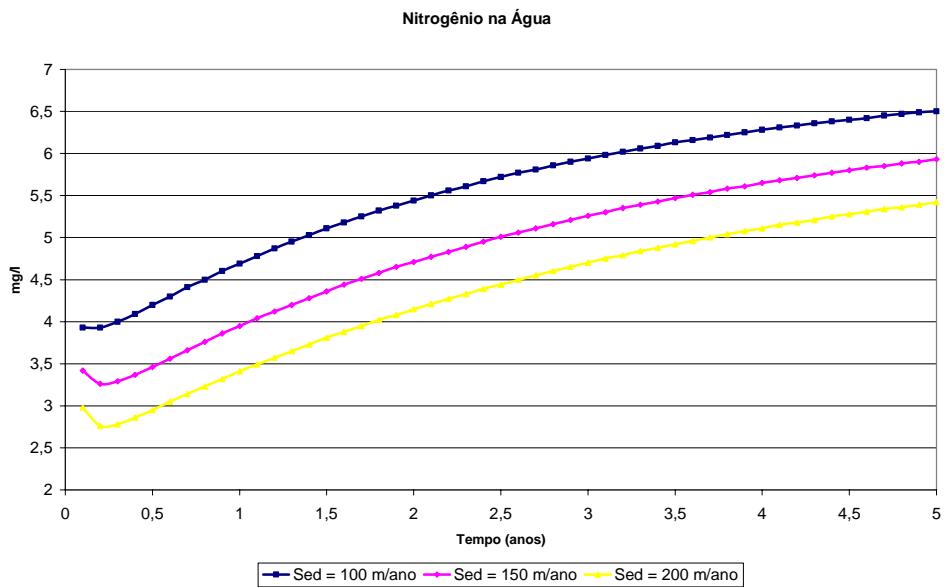


Figura 5 – Variação do nitrogênio dissolvido na água de acordo com a taxa de sedimentação

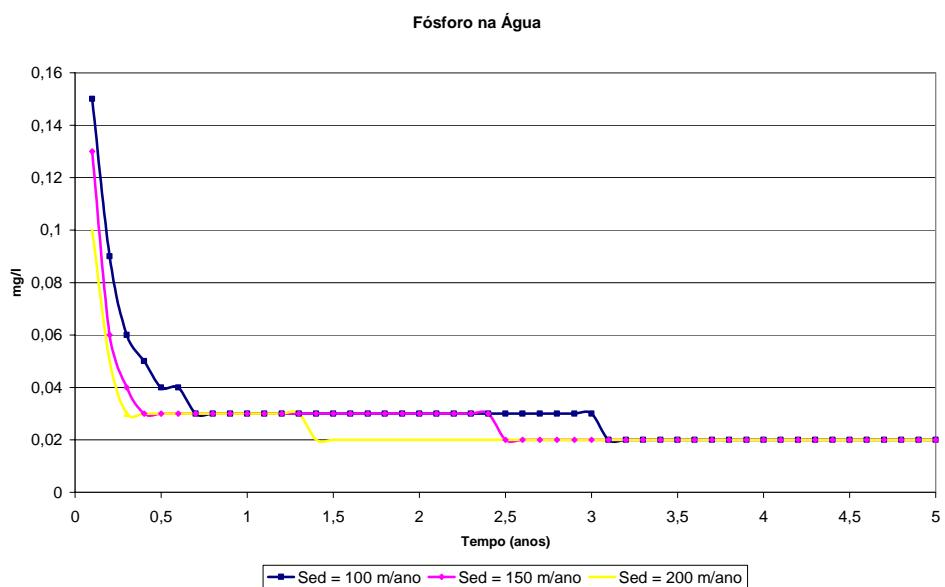


Figura 6 – Variação do fósforo dissolvido na água de acordo com a taxa de sedimentação

3.3 Sensibilidade quanto ao fator a

O fator a entra na avaliação de quanto do contaminante sai do reservatório devido à ciclagem da água em seu tempo de residência.

É facilmente observável a importância de definir o fator a com a máxima precisão possível, tendo em vista a elevada influência dele nas concentrações e, consequentemente, no estado trófico do lago.

Este fato pode ser explicado considerando a relação do fator a com o tempo de residência. Como a ciclagem influencia diretamente este fator, o tempo de residência torna-se então diretamente ligado a

ele. E, como se sabe, o tempo de residência é um parâmetro físico de fundamental importância no desenvolvimento dos processos de eutrofização em um reservatório.

Na Figura 7 pode-se observar o comportamento do nitrogênio item (a), do fósforo item (b) e da clorofila-a item (c), para diferentes valores do fator a. Como se pode observar, quanto maior for o fator a menor é a concentração do nutriente no reservatório, esse fato ocorre nas três análises. Isto é explicado pelo fato de que quanto maior o fator a maior a quantidade de nutriente que deixa o reservatório através de um processo de ciclagem, fazendo com que as concentrações desses nutrientes tornem-se cada vez menores.

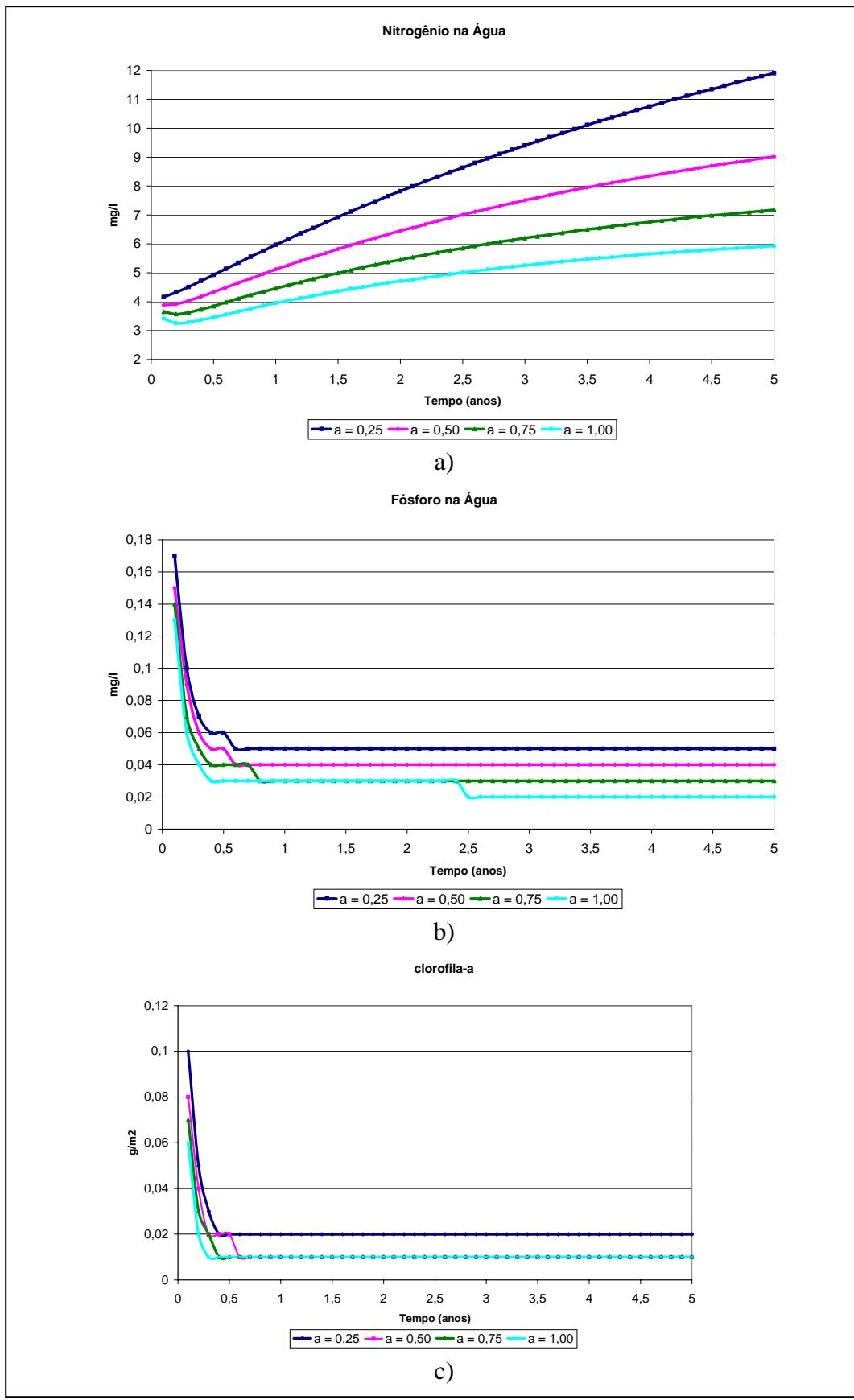


Figura 7 – a) variação do nitrogênio dissolvido na água de acordo com o fator a; b) variação do fósforo dissolvido na água de acordo com o fator a; c) variação da clorofila-a de acordo com o fator a

3. CONCLUSÃO

Os resultados dessa pesquisa, onde um conjunto de simulações foi realizado no Açude Acarape do Meio, permitiram concluir que do ponto de vista sensibilidade, parâmetros como o tempo de detenção hidráulica e o fator a se apresentam com uma maior sensibilidade na análise dos modelos do que a taxa de sedimentação. A análise dos resultados permitiu verificar que, como o tempo de residência da água influencia diretamente o fator a, a variação desses parâmetros altera consideravelmente o comportamento das concentrações de nutrientes no interior dos reservatórios. Assim, deve ficar claro que quanto maior o tempo de residência da água maior é a concentração de nutrientes para uma mesma entrada de nutrientes no reservatório. Por outro lado, com relação ao fator a ocorre exatamente o inverso, quanto maior o fator a menor a concentração de nutrientes no reservatório.

Foram ainda realizadas outras simulações que indicam que outros parâmetros são igualmente importantes, tais como as frações imobilizadas e liberadas de fósforo e nitrogênio no sedimento. Contudo, para concluir sobre estes outros fatores, mais simulações devem ser realizadas de forma a concluir de forma categórica quanto a tais parâmetros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa-CNPq e à Coordenadoria de Capacitação de Recursos Humanos Programa de Demanda Social-CAPES, pelo apoio à pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

ARHONDITSIS, George B.; BRETT, Michael T. Eutrophication model for Lake Washington (USA) Part I. Model description and sensitivity analysis. Ecological Modelling, vol. 187, p. 140-178. 2005.

CEARÁ. Governo do Estado. Portal de Serviços e Informações do Estado do Ceará. Notícias sobre o Gerenciamento de Bacias Hidrográficas. http://www25.ceara.gov.br/noticias/noticias_detalhes.asp?nCodigoNoticia=1012. Fortaleza, CE. 2001. Acessado em 28/01/07.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH). Plano Estadual de Recursos Hídricos - PLANERH. Fortaleza, CE. 2005.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH). Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos e Meteorológicos do Ceará. <http://www.srh.ce.gov.br/atlas>. Fortaleza, CE. 2007.

EDMONDSEN, Yvette H., The role of prediction in limnology. *Limnol. Oceanogr.* 31(5), p. 1143-1159. 1986.

IBGE. Censo Demográfico 2000. Acessado em 06/02/07: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/tabelabrasil111.shtml>. 2000.

JØRGENSEN, S.E.; YAMASHIKI, Y.; TSUNO, H.; HIDAKA, T.; MAHLER, H.; SANTIAGO, V. PAMOLARE training package, planning and management of lakes and reservoirs: models for eutrophication management. United Nations Environment Programme – Division of Technology, Industry and Economics – International Environmental Technology Centre. Disponível em: http://www.unep.or.jp/ietc/Pamolare/about_pamolare.asp. Acessado em 30/04/2007, Shiga, Japão. 2003.

KUO, Jan-Tai; LUNG, Wu-Seng; YANG, Chou-Ping; LIU, Wen-Cheng; YANG, Ming-Der; TANG, Tai-Shan. Eutrophication modeling of reservoirs in Taiwan. *Environmental Modelling & Software*, vol. 21, p. 829-844. 2006.

SANTOS, Maria da Conceição Raimundo; PACHECO, Dina Maria D. M.; SANTANA, Fernando José Pires; RODRIGUES, Antônio Manuel Fernandes. A eutrofização das lagoas das Sete-Cidades e Furnas (S. Miguel – Açores) – Análise evolutiva entre 1998 e 2002. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, In: VII Congresso da Água. 2004.

VOLLENWEIDER, R. A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweiz. Zeit. Hydrol.*, vol. 37, p. 53-84. 1975.