

Artigo Técnico

Operação de reservatório em função da contribuição média de fósforo - Parte II

Reservoir operation based on the average phosphorus contribution - Part II

Ioná Maria Beltrão Rameh Barbosa¹, José Almir Cirilo²

RESUMO

Este trabalho descreve a metodologia e os resultados obtidos de uma pesquisa que teve como objetivo definir estratégias de operação do reservatório, mas especificamente dos volumes liberados pela descarga de fundo, na tentativa de reduzir as concentrações de fósforo e, conseqüentemente, a tendência à eutrofização das águas do reservatório Jucazinho, no Agreste Pernambucano. A metodologia do balanço de massa foi adotada para simular o fósforo total, em função de cenários de reduções do aporte deste nutriente através da implantação de estações de tratamento dos efluentes domésticos e industriais e no volume de água médio retirado do reservatório. Os cenários simulados indicaram que a operação adequada para a renovação da água juntamente com a implantação de padrões elevados de tratamento dos esgotos na bacia podem levar à recuperação da qualidade da água a médio prazo.

Palavras-chave: recuperação de reservatório; eutrofização; Jucazinho.

ABSTRACT

This paper describes the steps taken and the results of a research that aimed to develop strategies for reservoir operation, but specifically the volumes released by bottom discharge in an attempt to reduce phosphorus concentrations and hence the tendency to eutrophication of the Jucazinho water reservoir, located in the Agreste Region of Pernambuco State, Brazil. A mass balance approach was adopted to simulate the total phosphorus, depending on scenarios of nutrient reductions through the implementation of treatment plants of domestic and industrial effluents and the average water withdrawn from the reservoir. The simulated scenarios indicated that the appropriate operation for the renewal of water along with the implementation of high standards of sewage treatment can lead to the recovery of water quality in the medium term.

Keywords: rehabilitation of reservoir; eutrophication; Jucazinho.

INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial tem acelerado a construção de reservatórios, que surgem como uma das alternativas para o suprimento da demanda crescente por água. Muitos desses, e também lagos naturais do mundo todo, têm sofrido sérios prejuízos no tocante à qualidade das águas e, conseqüentemente, têm apresentado impactos nos usos múltiplos para os quais o reservatório se destina (BARBOSA, 2012; MARGALEF, 2002; TUNDISI & TUNDISI, 2008).

O aporte de nutrientes constitui-se um dos maiores problemas em reservatórios artificiais (BARBOSA *et al.*, 2006; COTOVICZ JÚNIOR *et al.*, 2013; CUNHA; BOTTINO; CALIJURI, 2010; SMITH & SCHINDLER, 2009). Em se tratando de reservatórios nordestinos, a situação é ainda mais grave tendo em vista que apresentam um elevado fator de envolvimento (área da bacia de drenagem/área do reservatório) e elevado tempo de residência da água, o que favorece a retenção de nutrientes e sedimentos exportados de suas bacias de drenagem, tornando-os

altamente vulneráveis a eutrofização (FREITAS; RIGHETTO; ATTAYDE, 2011; THORNTON & RAST, 1993).

A eutrofização desencadeada pelo excesso de nitrogênio e fósforo em corpos hídricos tem sido alvo de estudos em função do perigo que estas águas oferecem, principalmente quando utilizadas para o abastecimento humano. Em um ambiente eutrofizado, poderão proliferar cianobactérias em detrimento de outras espécies aquáticas, as quais podem produzir toxinas que causam sérios danos à vida animal e à saúde humana, podendo até mesmo levar à morte (CONLEY *et al.*, 2009; OLIVEIRA & MOLICA, 2003; RABALAIS *et al.*, 2009).

A determinação da carga de nutrientes, assim como a determinação do balanço de massa, através das estimativas de entradas, saídas e retenção de nutrientes no corpo hídrico, são importantes ferramentas para a definição de estratégias de recuperação de reservatórios eutrofizados (FREITAS; RIGHETTO; ATTAYDE, 2011; TORRES; RESCK;

¹Engenheira civil e professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE) – Recife (PE), Brasil.

²Engenheiro civil. Secretário de Recursos Hídricos e Energéticos do Estado de Pernambuco. professor titular da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Caruaru (PE), Brasil.

Endereço para correspondência: Ioná Maria Beltrão Rameh Barbosa – Avenida Professor Luiz Freire, 500 – Cidade Universitária – Recife (PE), Brasil – 50740-540 – E-mail: ionarameh@yahoo.com.br

Recebido: 19/01/2015 – **Aceito:** 23/02/16 – **Reg. Abes:** 145025

PINTO-COELHO, 2007; TUNDISI & TUNDISI, 2011; VIDAL & CAMPELO NETO, 2014).

Adicionalmente, quando a eutrofização é um problema a ser enfrentado, o controle do tempo de residência da água no reservatório se constitui uma estratégia de operação para recuperar a qualidade hídrica (DUARTE *et al.*, 2008; ARAÚJO *et al.*, 2008) e controlar a biomassa de cianobactérias e, portanto, os florescimentos indesejáveis que podem produzir toxinas (STRASKRABA *et al.*, 1993; TUNDISI & TUNDISI, 2011). Contudo, estudos revelam que esta técnica favorece a remobilização dos sedimentos para a coluna de água (PADOVESI-FONSECA; PHILOMENO; ANDREONI, 2009; ALBUQUERQUE, 2005; FRANZEN *et al.*, 2009) e, portanto, deve ser conduzida com certos cuidados, pois ocasiona efeitos adversos no corpo hídrico e no seu trecho a jusante (TUNDISI & TUNDISI, 2011).

Este artigo, juntamente com o artigo anterior, apresenta os resultados obtidos com a simulação de entrada, acumulação e saída de fósforo total no reservatório Jucazinho. O objetivo deste trabalho foi definir estratégias de liberação da água, pela descarga de fundo, visando à melhoria da qualidade hídrica em relação às concentrações de fósforo total e, conseqüentemente, a tendência à eutrofização. Para isso, foram adotados alguns cenários de tratamento dos efluentes na bacia de contribuição e utilizada a metodologia do balanço de massa para simulação das concentrações de fósforo total no reservatório no período compreendido entre março de 2012 a agosto de 2023.

METODOLOGIA

Cenários Previstos

Os cenários adotados para a simulação das concentrações de fósforo total em Jucazinho foram estabelecidos admitindo-se duas hipóteses:

1. Haverá uma redução de aporte de fósforo a Jucazinho com a implantação de estações de tratamento de esgoto nas cidades a montante do reservatório, localizadas às margens do Capibaribe e no remanso, assim como nas lavanderias de jeans na cidade de Toritama e;
2. Haverá uma redução de fósforo no reservatório Jucazinho com a retirada de volume de água devido ao vertimento, à captação da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) para o abastecimento e a descarga de fundo com o funcionamento da válvula dispersora.

Para definição dos cenários também foram levadas em consideração algumas informações importantes sobre o esgotamento sanitário de Santa Cruz do Capibaribe e de Toritama, o tratamento dos efluentes industriais das lavanderias e sobre o sistema de abastecimento de água de Jucazinho. Admitiu-se que nos anos de 2012 e 2013, mesmo

estes municípios sendo contemplados com estação de tratamento de esgoto (ETE), não será possível a implantação e operação do sistema antes desta data; portanto, não haverá redução de aporte de fósforo ao reservatório para este período em todos os cenários considerados no trabalho. Para os anos seguintes, procurou-se em literatura valores de referência de redução de fósforo com dispositivos de tratamento.

Sabe-se que a eficiência alcançada em sistemas de tratamento de efluentes é função da tecnologia de tratamento adotada. A escolha está condicionada, dentre outros fatores, à qualidade requerida para o efluente com o objetivo de atender à legislação ambiental. O tratamento a nível preliminar e primário pode reduzir a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos sedimentáveis e coliformes, porém não é eficiente na redução de nutrientes no esgoto doméstico. Já o nível secundário, além de reduzir consideravelmente estes três parâmetros, reduz de 25 a 40% as concentrações de fósforo, a não ser que seja prevista etapa específica de remoção, passando a ser considerado nível secundário com remoção de nutrientes (METCALF & EDDY, 2003).

Em relação aos efluentes industriais, as alternativas são bastante variadas, porém a escolha do processo deve estar associada, dentre outros fatores, à eficiência desejada, aos constituintes que se pretende reduzir e, obviamente, aos custos de implantação e operação. Vários autores mencionam que o tratamento do efluente têxtil pode ser realizado por processos biológicos ou físico-químicos, sendo os primeiros mais atraentes sob o ponto de vista econômico (FERRAZ JR., 2010; VAN DER ZEE & VILLAVERDE, 2005; VERMA & MADAMWAR, 2003).

Em relação à remoção do fósforo de efluentes têxteis, existem poucos relatos de experiências brasileiras. Santos, Brayner e Florêncio (2003) alcançaram índices de 44 a 95% de remoção de fósforo em efluente de lavanderia de jeans, localizada em Toritama (PE). O tratamento físico-químico era realizado com a adição de solução de sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ e de hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, passando pelas etapas de homogeneização, coagulação, floculação e decantação. O tratamento físico-químico, muitas vezes empregado em indústrias têxteis, objetiva a remoção de sólidos suspensos e não especificamente do elemento fósforo. Porém, como este nutriente é facilmente adsorvido às partículas em suspensão na água, a concentração de fósforo no efluente é reduzida indiretamente.

Segundo Chagas (2009) e informações da Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH), o tratamento comumente empregado pelas lavanderias pernambucanas adota apenas as etapas de equalização, coagulação, floculação e decantação, consideradas como tratamento primário, as quais são pouco eficientes em relação à redução de matéria orgânica e, conseqüentemente, ao fósforo, chegando a no máximo 50% de eficiência em relação à DBO (CPRH, 2001). Sendo assim, estas indústrias, possivelmente, para atender às exigências ambientais, devem recorrer à adoção de um sistema complementar de tratamento para melhoria do efluente final.

Considerando que as lavanderias devem complementar seus sistemas de tratamento de efluentes para se adequar ao padrão de lançamento, conforme estabelece a Resolução 430/11 do CONAMA (BRASIL, 2011) e que estes podem alcançar elevados níveis de eficiência, adotou-se nos cenários um percentual de redução de fósforo que repercute significativamente no conteúdo deste nutriente lançado ao rio e, conseqüentemente, que chega a Jucazinho e que seja possível de ser adotado pelas empresas da região.

Por outro lado, a redução de fósforo devido ao volume retirado do reservatório levou em conta, além da vazão de retirada, a respectiva concentração média de fósforo na água.

Considerando-se os dados de eficiência com a implantação de ETE para tratamento de efluentes domésticos e industriais citados em bibliografia e o volume de água retirado mensalmente de Jucazinho, definiram-se alguns cenários para a simulação das concentrações de fósforo total.

O primeiro deles (cenário 1) foi configurado admitindo-se que não haverá nenhuma redução no aporte de fósforo a Jucazinho, e que todo o volume mensal definido para a descarga de fundo no reservatório, seja no período de chuva ou estiagem, poderá ser liberado sem prejuízos à qualidade da água do rio no trecho a jusante. Esse cenário corresponde, portanto, à permanência da situação atual, sem tratamento, e busca simular o efeito tão somente da renovação da água no reservatório.

Para constituir o cenário 2 e o cenário 3, adotou-se uma redução de 25 e 40%, respectivamente, no aporte de fósforo devido à operação das ETES nas cidades às margens do Capibaribe, a montante de Jucazinho, para todos os meses, a partir de 2014, e o mesmo volume mensal liberado pela descarga de fundo adotado no cenário 1.

O cenário 4 foi estabelecido com as mesmas reduções de fósforo adotadas no cenário 3 e uma redução de 40% de fósforo total com o tratamento dos efluentes domésticos do povoado de Trapiá, pertencente ao município de Riacho das Almas, localizado no remanso do reservatório.

Para formulação do cenário 5, levou-se em consideração as mesmas reduções de fósforo adotadas no cenário 4 para os efluentes domésticos e uma redução de 80% para a concentração de fósforo no efluente final das lavanderias, já que a carga proveniente destas ETES pode ser bastante reduzida, dependendo do processo de tratamento adotado.

Finalmente, o cenário 6 foi constituído adotando-se as mesmas reduções de fósforo do cenário 5, além de uma etapa complementar de tratamento, que deverá ser adotada nas ETES implantadas nas comunidades, a qual deve conferir uma redução de 90% do fósforo total contido nos efluentes domésticos antes de serem lançados ao rio Capibaribe.

Sabe-se que a maioria dos sistemas de esgotamento sanitário (SES) implantados em comunidades não contempla etapa específica de remoção de nutrientes. Porém, levou-se em consideração que para alcançar valores reduzidos de fósforo aportado a Jucazinho será necessária a

inclusão desta etapa, já que os esgotos das comunidades representam a maior parte do fósforo afluente ao reservatório.

Balanço de Massa

Para Jucazinho, o balanço de massa foi realizado mensalmente e as seguintes equações e variáveis foram consideradas:

$$TP_{(t+1)} = TP_{(t)} + TP_{\text{aflu}(t)} - TP_{\text{capt}(t)} - TP_{\text{vert}(t)} - TP_{\text{desc}(t)} \quad (1)$$

Onde:

$TP_{(t+1)}$ = carga de fósforo total vinculada ao volume do reservatório no mês t+1;

$TP_{(t)}$ = carga de fósforo total vinculada ao volume do reservatório no mês t;

$TP_{\text{aflu}(t)}$ = carga média de fósforo total vinculada ao volume afluente no mês t;

$TP_{\text{capt}(t)}$ = carga de fósforo total vinculada ao volume de água captado pela COMPESA para o abastecimento público no mês t;

$TP_{\text{vert}(t)}$ = carga de fósforo total vinculada ao volume de água vertido no mês t;

$TP_{\text{desc}(t)}$ = carga de fósforo total vinculada ao volume de água liberado pela válvula dispersora para descarga de fundo no mês t.

A carga de fósforo total no Jucazinho $TP_{(t)}$ para março de 2012 foi admitida ser a mesma verificada em setembro de 2011, a qual foi obtida em função da amostragem deste nutriente na coluna de água, conforme descrito no artigo anterior.

A carga média afluente $TP_{\text{aflu}(t)}$ foi definida por meio de um modelo de regressão, descrito no artigo anterior. Contudo, admitiu-se que a carga gerada nas cidades a montante do reservatório só será carregada para o reservatório no período chuvoso, ou seja, nos meses de maio, junho, julho e agosto. Desta forma, considerou-se que Jucazinho recebe, nos dois primeiros meses de chuva, metade da carga gerada nos meses de setembro a abril, adicionada à própria carga do mês. Para os outros dois meses desse período (julho e agosto), a carga aportada é apenas a carga mensal gerada. No restante dos meses do ano, considera-se que a carga é gerada na fonte e lançada ao rio Capibaribe, porém, devido às baixas vazões, fica estagnada ao longo do percurso, não alcançando o reservatório, sendo considerada nula para os meses de setembro a abril.

A carga vinculada ao volume de descarga $TP_{\text{desc}(t)}$ e ao volume vertido $TP_{\text{vert}(t)}$ foram obtidas pelo produto dos respectivos volumes considerados e a concentração média de fósforo verificada no reservatório no mês t.

A carga média captada $TP_{\text{capt}(t)}$ foi determinada em função do volume médio captado pela COMPESA para o abastecimento público e a respectiva concentração média mensal de fósforo no reservatório

no mês em questão. Para início das simulações, admitiu-se que a concentração média de fósforo verificada na coluna de água do reservatório, em setembro de 2011, será a mesma no mês de março de 2012, início da simulação.

Para iniciar o balanço de massa é necessário determinar também o volume no mês seguinte. Com o volume de água atual e afluyente no mês t e os volumes retirados do reservatório, seja pela captação da COMPESA, descarga de fundo ou vertimento, chega-se a um novo volume, que corresponde ao volume no início do mês seguinte ($t+1$), dado pela seguinte equação):

$$\text{Vol}_{(t+1)} = \text{Vol}_{(t)} + \text{Vol}_{\text{afu}(t)} - \text{Vol}_{\text{capt}(t)} - \text{Vol}_{\text{evap}(t)} - \text{Vol}_{\text{desc}(t)} \quad (2)$$

Onde:

$\text{Vol}(t+1)$ e $\text{Vol}(t)$ = volume do reservatório no mês $t+1$ e t , respectivamente;

$\text{Vol}_{\text{evap}(t)}$ = volume médio afluyente ao reservatório no mês t ;

$\text{Vol}_{\text{capt}(t)}$ = volume captado para o abastecimento público no mês t ;

$\text{Vol}_{\text{evap}(t)}$ = volume médio evaporado no mês t ;

$\text{Vol}_{\text{desc}(t)}$ = volume de saída pela descarga de fundo no mês t .

Vale ressaltar que os volumes retirados para outros fins, como por exemplo, para irrigação de áreas no entorno do reservatório e a dessementação de animais foram considerados não significativos.

Para o início da simulação foi definido o volume do reservatório em março de 2012 como sendo o mesmo volume verificado no final de setembro de 2011 subtraído dos volumes mensalmente retirados pela COMPESA para o abastecimento e o volume médio evaporado nos meses de outubro a fevereiro.

O volume afluyente para os meses de setembro a abril, por ser um período de baixos índices pluviométricos na região, foi considerado nulo. Apenas nos meses de maio, junho, julho e agosto, considerados meses chuvosos, é que se verifica alguma afluência ao reservatório. Para estes meses, definiu-se um volume médio afluyente, em função da afluência média mensal verificada no período de 2008 a 2011, através dos respectivos volumes observados.

O volume captado mensalmente do reservatório é de 3,92 milhões de $\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$ (vazão média diária captada de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e foi obtido junto à COMPESA; o volume médio evaporado foi calculado a partir da evaporação média na bacia.

O planejamento da operação de Jucazinho estabelece que, a partir de 2012 com o funcionamento do flutuante compartilhado com a válvula dispersora, há a possibilidade de descarga de fundo, para uma efetiva renovação da massa líquida e possível melhoria na qualidade da água. O desafio do planejamento é determinar que volumes devem ser liberados pela descarga de fundo, para que se atinja, dentro de certo período de tempo, o padrão recomendado pela Resolução CONAMA 357/05, para águas salobras em ambientes lênticos de classe I, no qual o Jucazinho se enquadra.

Para definição do volume de descarga foi necessário adotar um volume mínimo para que haja liberação da água pela descarga de fundo. Adotou-se a cota 286, cujo nível da água no reservatório atinge um volume de acumulação de $237.047.545 \text{ m}^3$. Esse valor corresponde à cota mínima para operação do sifão.

Diante desta realidade, o balanço de massa foi embasado na ideia de que no início do período chuvoso (mês de maio), o volume acumulado no reservatório deve ser igual ao volume mínimo adotado, para que haja maior capacidade de acumulação, podendo, desta forma, dependendo das afluências, haver maior renovação da água com a operação da descarga de fundo. Para isso, definiu-se que, nos meses de estiagem (de setembro a abril), o volume a ser liberado na descarga de fundo deverá ser igual para todos os meses do período e definido em função do volume verificado no primeiro mês do período subtraído do volume mínimo adotado e das retiradas mensais (captação da COMPESA, vertimento e evaporação), dividido pelo número de meses do período analisado.

Por outro lado, para os meses chuvosos (maio, junho, julho e agosto), admitiu-se que o volume de descarga deverá aproveitar a capacidade de diluição do rio, que se verifica com a chegada do período chuvoso. Sendo assim, admitiu-se que o volume de descarga para estes meses deverá ser um percentual dos volumes médios mensais vertidos, no período de 2008 a 2011.

Com a informação do nível da água no reservatório, o tipo de vertedouro da barragem (parede delgada) e a sua extensão foi possível obter a vazão vertida diariamente e, conseqüentemente, o volume vertido. O volume mensal vertido foi obtido pela soma dos volumes vertidos diariamente no mês considerado. Com este valor, obteve-se o volume médio mensal para cada ano e para o período em questão.

Por outro lado, também levou-se em conta, para a definição da descarga de fundo, a vazão de restrição, conforme mencionado no Projeto Básico da Barragem Jucazinho (BRASIL, 1991). Desta forma, a operação do reservatório deve manter uma vazão mínima de $0,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ou seja, um volume de 1,31 milhões de m^3 deve ser liberado mensalmente do reservatório, pela descarga de fundo, como vazão ecológica.

Para isso utilizou-se processo de otimização, cuja função objetivo foi maximizar a diferença entre a menor descarga simulada e a vazão de restrição definida para Jucazinho. Com a restrição imposta ao problema asseguram-se vazões de descarga maiores ou iguais à vazão de restrição adotada, em todo o período analisado.

Após definição dos termos da Equação 2, que define a carga média de fósforo em ($t+1$), ou seja, no início do mês seguinte, juntamente com o volume obtido em ($t+1$), de acordo com a Equação 3, obtém-se a nova concentração média no reservatório, a saber:

$$\text{Conc TP}_{(T+1)} = \frac{\text{TP}_{(T+1)}}{\text{Vol}_{(T+1)}} \quad (3)$$

Onde:

$\text{ConcTP}(t+1)$ = concentração média de fósforo total no reservatório no mês $t+1$;

$\text{TP}(t+1)$ = carga de fósforo total vinculada ao volume do reservatório no mês $t+1$;

$\text{Vol}(t+1)$ = volume do reservatório no mês $t+1$.

Vale ressaltar que a concentração de fósforo no final do mês atual é a mesma no início do mês seguinte ($t+1$), bem como seu volume e carga. Sendo assim, prosseguiu-se o balanço de massa para todos os meses posteriores.

Estratégia experimental para a descarga de fundo

Como se sabe, a qualidade da água a ser liberada pela descarga de fundo é bastante deteriorada em função da sedimentação de elementos nas camadas mais profundas do reservatório. Por esta razão, é prudente a realização de testes operacionais com a liberação de volumes previstos nesta pesquisa, efetuando-se monitoramento da água em pontos estratégicos no trecho, inclusive no próprio manancial.

Em articulação com a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e a COMPESA foi definida uma estratégia de abertura da descarga de fundo do reservatório, realizada no período de 30 de janeiro de 2012 a 24 de fevereiro de 2012. Procedeu-se a liberação de uma vazão de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de água durante este período e coletaram-se amostras de água em três pontos a jusante de Jucazinho: o primeiro ponto localizado a 1 km do barramento; o segundo e o terceiro, a montante e jusante da cidade de Limoeiro, respectivamente. Também foram realizadas coletas de água no próprio manancial na superfície do lago, a dez e a trinta metros de profundidade, visando conhecer o comportamento do fósforo dentro do reservatório após abertura da válvula de descarga. Os parâmetros escolhidos para monitoramento do rio em face da descarga de fundo de Jucazinho foram pH, OD, DBO, amônia, fósforo total, nitrato, nitrito, sulfato e alguns metais (cádmio, chumbo, cromo, manganês, zinco, níquel e ferro).

Para águas salobras (classe I), a CONAMA 357/05 estabelece que o limite de OD não deve ser inferior a $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e para o fósforo total deve ser de até $0,050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lântico e de $0,03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ para ambientes lânticos (águas doces classe II, considerada correspondente a classe I das águas solobras, conforme preconiza a CONAMA 357, Art. 8º, § 6º).

Como citado anteriormente, foi adotado um volume mínimo no reservatório para a operação de descarga de fundo em Jucazinho. Esta imposição já foi levada em consideração no balanço de massa estabelecido, porém a qualidade da água também é uma restrição a ser atendida nesta operação. Com o teste, avaliou-se o comportamento da água

liberada no trecho a jusante de Jucazinho e no manancial, garantindo a segurança quanto à qualidade da água do rio em face à liberação dos volumes de descarga definidos nesta pesquisa.

RESULTADOS

Com os cenários definidos e a equação de balanço de massa estabelecida com a quantificação dos termos envolvidos, procedeu-se a simulação das concentrações de fósforo total no reservatório Jucazinho, cujos resultados estão apresentados na Figura 1.

A Tabela 1 apresenta, com mais detalhes, os resultados da simulação, adotando-se os cenários previstos nesta pesquisa. Vale lembrar que, em todos os cenários, foram adotados os mesmos valores de concentração e carga iniciais (março de 2012), os quais foram $0,45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e 138,08 toneladas, respectivamente.

DISCUSSÃO

De acordo com os resultados das simulações, adotando-se o cenário 1, verifica-se que mesmo não havendo redução de aporte de fósforo com a implantação das ETES nas cidades a montante do reservatório, porém mantendo-se a vazão de restrição de $0,56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nos meses de estiagem, e nos meses chuvosos uma vazão de 20% da vazão média mensal vertida no meses de maio a agosto para a descarga de fundo, haverá uma diminuição gradativa das concentrações de fósforo em Jucazinho, chegando-se ao valor de $0,15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ em agosto de 2023, como apresentado na Tabela 1.

O cenário 2 e 3 com o tratamento dos esgotos domésticos a este nível de eficiência produziu pouco efeito quando comparado com as concentrações de fósforo simuladas com o cenário 1. O sistema de esgotamento sanitário e o devido tratamento produzirão concentrações de fósforo no reservatório de $0,13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, para o cenário 2 e $0,12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, para o cenário 3, em agosto de 2023.

Por outro lado, após as reduções de fósforo em Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, verifica-se que o aporte ainda é razoavelmente alto devido às contribuições de esgoto do povoado de Trapiá, situada no remanso de Jucazinho, e das lavanderias de jeans em Toritama. Portanto, para produzir efeitos significativos na qualidade da água do reservatório no período de tempo analisado, deve-se recorrer à associação dos tratamentos dos efluentes (doméstico e industrial) para que se atinja o nível de qualidade desejado. Portanto, foram previstos outros cenários.

Para o cenário 4, observa-se que em agosto de 2023 a concentração de P em Jucazinho será reduzida a $0,11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, caso permaneçam os mesmos níveis de produção e redução de aporte de fósforo estimados e a mesma vazão de descarga para os meses do ano, conforme apresentado na Tabela 1.

No cenário 5, de acordo com a simulação, com os níveis de redução de fósforo estabelecidos, a concentração média de fósforo será de 0,09 mg.L⁻¹, em agosto de 2023.

Contudo, nenhum dos cenários previstos conferiu a Jucazinho concentrações médias de P abaixo ou igual ao que recomenda a legislação ambiental. Neste sentido, o cenário 6 foi estabelecido como alternativa para alcançar, dentro do período estudado, o atendimento à legislação.

O cenário 6 conferiu a Jucazinho concentrações de fósforo total de 0,03 mg.L⁻¹, em agosto de 2023, caso mantenham-se as mesmas contribuições de esgotos e os níveis de eficiências nas ETES implantadas e as

vazões de descargas definidas para todos os meses do ano, no período de 2012 a 2023, conforme mostra a Tabela 1.

Observa-se na Figura 1 que os cenários 1 a 5 não conseguiram conferir a Jucazinho concentrações de fósforo total abaixo ou igual a 0,03 mg.L⁻¹, conforme recomenda a Resolução 357/05 do CONAMA. Apenas a simulação adotando o cenário 6 conseguiu atender a referida Resolução. Vale ressaltar que após o ano de 2023, os resultados de concentração de fósforo apresentaram uma tendência a estabilização em todos os cenários previstos.

Quanto ao teste experimental com a operação da descarga de fundo, observou-se que maior parte dos dados relativos às formas

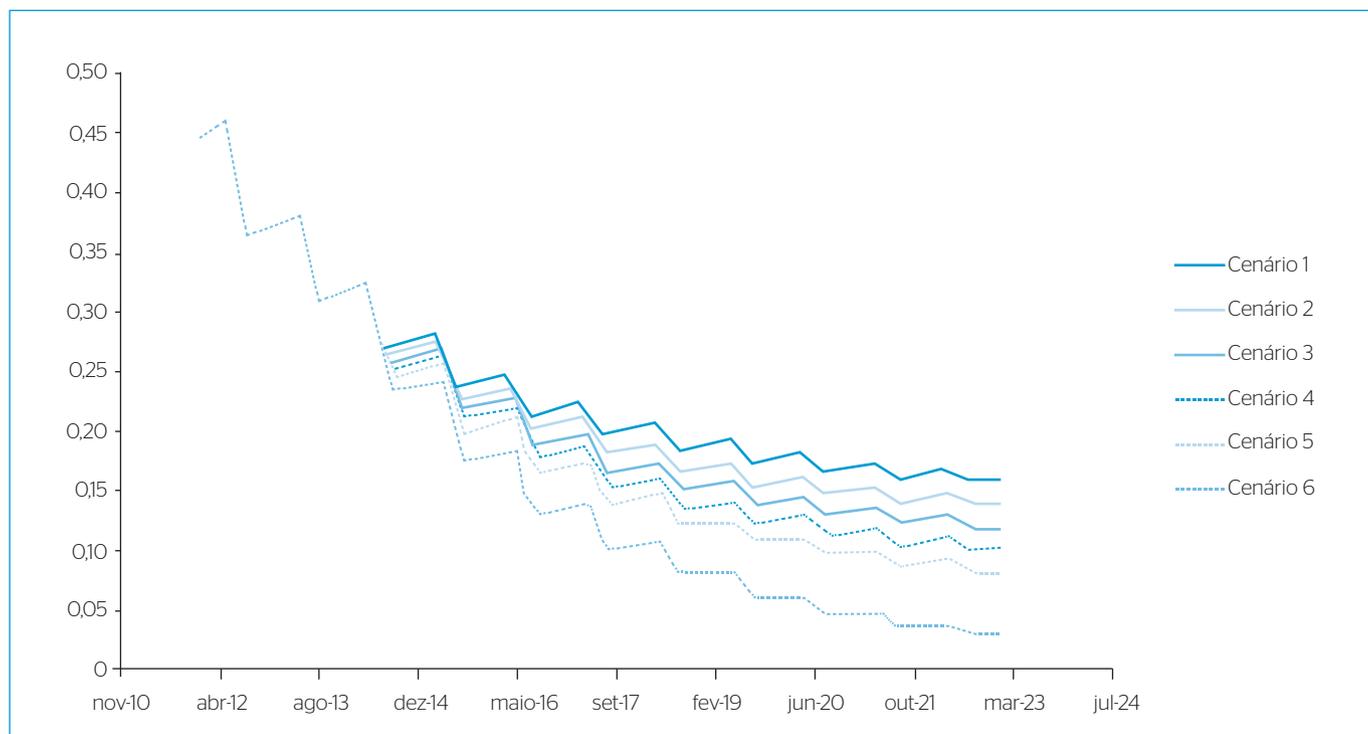


Figura 1 - Simulação das concentrações de Fósforo Total no reservatório Jucazinho para os cenários previstos.

Tabela 1 - Resultados das simulações de fósforo total no reservatório Jucazinho com os cenários previstos.

Cenário	Fósforo total agosto/2023 (mg.L ⁻¹)	Vazão média de descarga de fundo em m ³ .s ⁻¹					
		Março e abril de 2012	Meses de maio	Meses de junho	Meses de julho	Meses de agosto	Meses de setembro a abril
1- Situação atual: ausência de tratamento	0,15	9,07	3,11	1,73	1,20	0,50	0,56
2- ETES nas comunidades* com redução de 25% de aporte de P para efluente doméstico	0,13	9,07	3,11	1,73	1,20	0,50	0,56
3- ETES nas comunidades* com redução de 40% de aporte de P	0,12	9,07	3,11	1,73	1,20	0,50	0,56
4- ETES nas comunidades** com redução de 40% de aporte de P	0,11	9,07	3,11	1,73	1,20	0,50	0,56
5- ETES nas comunidades** com redução de 40% de aporte de P e 80% de redução de P com o tratamento dos efluentes industriais das lavanderias de Toritama	0,09	9,07	3,11	1,73	1,20	0,50	0,56
6- ETES nas comunidades** com redução de 40% de aporte de P, somado a redução de 90% do teor de fósforo total em etapa específica de tratamento, além de implantação de ETES com redução de 80% de P para tratamento dos efluentes industriais das lavanderias de Toritama	0,03	9,07	3,11	1,73	1,20	0,50	0,56

* Santa Cruz do Capibaribe e Toritama; ** Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e Trapiá; ETES: Estações de Tratamento de Esgotos.

de nitrogênio, seja no rio ou no reservatório, não foi detectada nas análises. Porém, o fósforo total em nenhuma das coletas de água no rio atende a legislação, permanecendo acima do limite de 0,05 mg P.L⁻¹, independente da liberação da água pela descarga de fundo, indicando pontos de poluição ao longo do percurso. Para o reservatório, nas diferentes profundidades, o fósforo permaneceu acima de 0,03 mg P.L⁻¹, limite máximo permitido pela Resolução 357/05 do CONAMA, apresentando valores elevados para as maiores profundidades (ressuspensão).

A avaliação da DBO e do oxigênio dissolvido (OD) deve ser feita separadamente para os dois ambientes estudados. No reservatório verifica-se a elevação de DBO e a diminuição do OD com o aumento da profundidade, o que era previsto tendo em vista as condições impostas neste ambiente. Porém, a 1 km o OD é bem maior do que o liberado na descarga de fundo e a DBO é reduzida.

Para a análise da qualidade da água do rio, o teste revelou que até a montante do núcleo urbano da cidade de Limoeiro, a descarga de fundo efetuada em Jucazinho reproduziu a mesma tendência (OD e DBO) quando da sua não operação, porém com valores mais reduzidos de OD. Contudo, após a cidade, com a entrada dos esgotos do núcleo urbano, verifica-se que a DBO se eleva, a ponto do rio não conseguir, dentro do trecho analisado, voltar a reproduzir a tendência anterior a abertura da válvula de descarga.

CONCLUSÕES

Todos os cenários previstos (cenário 1 ao 6) apresentaram reduções significativas nas concentrações médias de fósforo total, em agosto de 2023, inclusive para o cenário 1 que não conta com redução no aporte deste nutriente.

Torna-se evidente a necessidade de associar o tratamento dos esgotos domésticos dos núcleos urbanos a montante de Jucazinho com o tratamento dos efluentes industriais das lavanderias de jeans em Toritama para reduzir o aporte de fósforo ao rio e, consequentemente, a Jucazinho.

Apenas o cenário 6, com a etapa complementar de tratamento dos esgotos domésticos nas comunidades e tratamento de efluentes industriais, é que foi possível conferir a Jucazinho concentrações de fósforo total igual ao que estabelece a legislação ambiental brasileira.

Com a análise dos resultados apresentados, percebe-se que as ações preventivas na bacia de contribuição como a implantação de estações de tratamento de efluentes e a operação eficiente do reservatório, com a devida liberação da descarga de fundo, devem influenciar consideravelmente na qualidade da água de Jucazinho. Quanto maior o nível de eficiência no tratamento dos efluentes e o volume de água renovado do manancial, menor será o tempo necessário para atingir o padrão recomendado pela legislação ambiental brasileira e menor será o risco de desencadear a eutrofização.

De forma geral, os resultados observados no teste experimental com a abertura da válvula descarga atestam que a operação do reservatório proposta pode ser feita sem risco de contaminação mais severa da água, dado que as vazões a serem liberadas serão inferiores a vazão imposta no teste realizado. Sendo assim, a liberação da água hipolimnética do reservatório, através da descarga de fundo, é uma técnica que deverá ser utilizada em Jucazinho, na tentativa de recuperar a sua qualidade, regularizar as vazões no trecho a jusante do barramento e, além disso, conferir um aumento na sua capacidade de contenção de enchentes.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, N.L. (2005) *Estudos da presença do manganês no reservatório Jucazinho localizado na bacia hidrográfica do rio Capibaribe no Agreste pernambucano- Brasil*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Recife. 96 p.

ARAÚJO, M.; COSTA, M.F.; AURELIANO, J.T.; SILVA, M.A. (2008) Mathematical modelling of hydrodynamics and water quality in a tropical reservoir, northeast Brazil. *Brazilian Journal of Aquatic Sciences and Technology*, v. 12, n. 1, p. 19-30.

BARBOSA, I.M.B.R. (2012). *Planejamento da operação de reservatório objetivando a melhoria da qualidade da água: estudo de caso no Agreste Pernambucano*. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 150 p.

BARBOSA, J.E.L.; ANDRADE, R.S.; LINS, R.P.; DINIZ, C.R. (2006) Diagnóstico do estado trófico e Aspectos limnológicos de sistemas aquáticos da Bacia Hidrográfica do Rio Taperoá, Trópico semi-árido Brasileiro. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, n. 1, p. 81-89.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2011) Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em ago. 2011.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. (1991) 3ª Diretoria Regional. Projeto Básico da Barragem Jucazinho. Estudos Hidrológicos. Recife: Geogruppo, 236p.

CHAGAS, M.A. (2009) *Tratamento de efluente têxtil por processo físico-químico e biológico*. Dissertação (mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)- Universidade Federal de Pernambuco- CTG, Departamento de Engenharia Civil, Recife. 85f.

CPRH - COMPANHIA PERNAMBUCANA DE RECURSOS HÍDRICOS. (2001) Norma Técnica: Controle de carga orgânica em efluentes líquidos industriais Nº 2.001. Recife. Disponível em: <<http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/normas-cprh-2001.pdf>> Acesso em: set. 2011.

- CONLEY D. J.; PAERL, H.W.; HOWARTH, R.W.; BOESCH, D.F.; SEITZINGER, S.P.; HAVENS, K.E.; LANCELOT, C.; LIKENS, G.E. (2009) Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science Magazine*, v. 323, p. 1014-1015.
- COTOVICZ JÚNIOR, L.C.; BRANDINI, N.; KNOPPERS, B.A.; MIZERKOWSKI, B.D.; STERZA, J.M.; OVALLE, A.R.C.; MEDEIROS, P.R.P. (2013) Assessment of the trophic status of four coastal lagoons and one estuarine delta, eastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 185, p. 3297-3311.
- CUNHA, D.G.F.; BOTTINO, F.; CALIJURI, M.C. (2010) Land use influence on eutrophication-related water variables: case study of tropical rivers with different degrees of anthropogenic interference. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 22, n. 1, p. 35-45.
- DUARTE, A.A.L.S.; VIEIRA, J.M.P.; NETO, J.M.; PARDAL, M.A. (2008) Monitorização da hidrodinâmica e da qualidade da água no estuário do rio Mondego. *Engenharia Civil. Universidade do Minho*, n. 33, p. 65-74.
- FERRAZ JR, A.D.N. (2010) *Tratamento de efluente têxtil em reator UASB seguido de biofiltro aerado submerso*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 85 p.
- FRAZEN, M.; CYBIS, L.F.; MERTEN, G.H.; DUARTE, M.M.M.B.; LIMA, E.A.M.; MOURA, H.L.; CAVALCANTE, D.A.S.; SILVA, V.L. (2010) Geoquímica dos sedimentos orgânicos superficiais de fundo no reservatório Divisa, Rio Grande do Sul, Brasil. *Estudos Geológicos*, v. 20, n. 1, p. 69-80.
- FREITAS, F.R.S.; RIGHETTO, A.M.; ATTAYDE, J.L. (2011) Cargas de fósforo total e material em suspensão em um reservatório do semi-árido brasileiro. *Oecologia Australis*, v. 15, n. 3, p. 655-665.
- MARGALEF, R. (2002) La superficie del planeta y la organización de la Biosfera: reacción a los nuevos mecanismos añadidos por el poder creciente de los humanos. *Munibe (Ciencias Naturales - Natur Zientziak)*, n. 53, p. 7-14.
- METCALF, L. & EDDY H.P. (2003) *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. 4^o ed. Nova York. 1010p.
- OLIVEIRA, M.C.B. & MOLICA, R. (2003) Cianobactéria Invasora- Aspectos Moleculares e Toxicológicos de *Cylindropermopsis Raciborskii* no Brasil. *Revista Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento*, n. 30, p. 82-90.
- PADOVESI-FONSECA, C.; PHILOMENO, M.G.; ANDREONI, B.C. (2009) Limnological features after a flushing event in Paranoá reservoir, Central Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 21, n. 3, p. 277-285.
- RABALAIS, N.N.; TURNER, R.E.; DIAZ, R.J.; JUSTIC, D. (2009) Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, v. 66, p. 1528-1537.
- SANTOS, E.O.; BRAYNER, F.M.M.; FLORÊNCIO, L. (2003) Estudos das características dos efluentes gerados em lavandeias/tinturarias de jeans na cidade de Toritama- Pernambuco. In: *XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Anais... Joinville/SC: ABES.
- SMITH, V.H. & SCHINDLER, D.W. (2009) Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, v. 24, n. 4, p. 201-207.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J.G.; DUCAN, A. (1993) State of the art of reservoir limnology and water polity management. In: STRASKRABA, M. TUNDISI, J.G.; DUCAN, A. (EDS.) *Comparative reservoir limnology and water quality management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, v. 77, p. 213-288.
- THORNTON, J.A. & RAST, W. (1993) A test of hypothesis relating to the comparative limnology and assessment of eutrophication in semi-arid man-made lakes. In: M. STRASKRABA, M. TUNDISI, J. G. DUNCAN, A. (EDS.). *Comparative reservoir limnology and water quality management*. Kluwer, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, v. 77, p. 1-24.
- TORRES, I.C.; RESCK, R.P.; PINTO-COELHO, R.M. (2007) Mass balance estimation of nitrogen, carbon, phosphorus and total suspended solids in the urban eutrophic, Pampulha reservoir, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 19, n.1, p. 79-91.
- TUNDISI, J.G. & TUNDISI, T.M. (2008) *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos. 631 p.
- TUNDISI, J.G. & TUNDISI, T.M. (2011) *Água no Século XXI: Enfrentando a escassez*. 4. Ed. São Carlos: Rima. 256 p.
- VAN DER ZEE, F.P. & VILLAVERDE, S. (2005) Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes - a short review of bioreactors studies, *Water Research*, v. 39, p. 1425-1440.
- VERMA, P. & MADAMWAR, D. (2003) Decolorization of synthetic dyes a newly isolated strain of *Serratia marcescens*. *World Journal of Microbiology and Biotechnonology*, v. 19, n. 6, p. 615-618.
- VIDAL, T.F. & CAMPELO NETO, J. (2014) Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 4, p. 402-407.