Modelo para simulação de nitrogênio e fósforo em sistemas de recursos hídricos: aplicação no alto curso do rio Piranhas (PB)

Model for simulation of nitrogen and phosphorus in water resources systems: application in the upper reaches of the Piranhas river (PB)

• **Data de entrada:**
03/01/2019

• **Data de aprovação:**
03/12/2019

Thiago Cabral Nepomuceno^{1*} | Wilson Fadlo Curi¹ | Valterlin da Silva Santos¹ |
Tarciana Ramos Diniz Nepomuceno²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.008>

ORCID ID

Nepomuceno TC <https://orcid.org/0000-0002-3452-6647>
Curi WF <https://orcid.org/0000-0002-7024-7127>

Santos VS <https://orcid.org/0000-0002-4789-2937>
Nepomuceno TRD <https://orcid.org/0000-0002-7552-1148>

Resumo

A contribuição de efluentes domésticos e agrícolas tem sido responsável pelo aumento da concentração de nutrientes nos corpos hídricos superficiais. O presente trabalho propôs desenvolver e aplicar um modelo matemático para a simulação de nitrogênio e fósforo em sistemas de recursos hídricos. Os procedimentos matemáticos são realizados em duas etapas principais: a modelagem de nitrogênio e fósforo nas áreas agrícolas e a definição de sistemas de equações diferenciais ordinárias que permitam quantificar a concentração desses nutrientes nos corpos hídricos. O modelo foi aplicado em um sistema na região do alto curso do rio Piranhas - PB, levando em consideração rios, reservatórios, efluentes domésticos e agrícolas. Os resultados das simulações indicaram que os recursos hídricos são impactados significativamente pela ação dos efluentes, principalmente nos períodos de maior déficit pluviométrico, onde o volume dos reservatórios e as vazões nos trechos dos rios são reduzidos. Medidas preventivas e corretivas devem ser adotadas para esses tipos de sistema, de maneira a evitar o comprometimento da biota aquática e dos múltiplos usos aos quais as águas são destinadas. Desta forma, o modelo desenvolvido mostrou-se importante na quantificação da dinâmica comportamental de nitrogênio e fósforo em sistemas de recursos hídricos, possibilitando uma análise integrada dos principais fatores intervenientes nos seus ciclos.

Palavras-chave: Efluentes. Fertilizantes. Nutrientes. Reservatórios. Rios. Planejamento. Ciclos.

Abstract

The contribution of domestic and agricultural effluents has been responsible for increasing the concentration of nutrients in the surface water bodies. The present work proposed to develop and apply a mathematical model for the simulation of nitrogen and phosphorus in water resource systems. The mathematical procedures are performed in two main stages: the modeling of nitrogen and phosphorus in agricultural areas and the definition of systems of ordinary differential equations that allow quantifying the concentration of these nutrients in water bodies. The model was applied in a system in the upper Piranhas - PB river region, considering rivers, reservoirs, domestic and agricultural

¹ Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil.

² Universidade Estadual da Paraíba - Paraíba - Brasil.

* **Autor correspondente:** thiago.nepomucenoesa@gmail.com.

effluents. The results of the simulations indicated that water resources are significantly impacted by effluent action, especially during periods of higher rainfall deficit, when the volume of reservoirs and flows in river sections are reduced. Preventive and corrective measures should be adopted for this type of system, so as to avoid compromising the aquatic biota and the multiple uses to which ones the waters are destined. In this way, the developed model proved to be important in the quantification of the behavioral dynamics of nitrogen and phosphorus in water resources systems, allowing an integrated analysis of the main intervening factors in their cycles.

Keywords: *Effluents. Fertilizers. Nutrients. Reservoirs. Rivers. Planning. Cycle.*

1 INTRODUÇÃO

Devido à existência de muitas variáveis que devem ser minuciosamente estudadas, a definição e a quantificação dos diversos processos físico-químicos e microbiológicos reinantes em corpos hídricos superficiais são atividades extremamente complexas, demandando, desta forma, o auxílio de determinadas ferramentas. Na modelagem matemática, destacam-se as técnicas de simulação e otimização, com ampla aplicação na área de recursos hídricos (SANTOS et al., 2011).

Em relação à modelagem de nitrogênio e fósforo, trabalhos como os desenvolvidos por Montovani e Potelli (2013) e Vidal e Neto (2014) tratam da quantificação da dinâmica comportamental desses macronutrientes em corpos hídricos superficiais, com contribuições relacionadas a efluentes domésticos.

Em regiões agrícolas, com adição de fertilizantes fosfatados e nitrogenados, caso não exista um controle adequado da lixiviação e do escoamento superficial, pode ocorrer o aporte de nitrogênio e fósforo para o leito dos rios e reservatórios próximos (CARDOSO et al., 2012; KAUFMANN et al., 2014; COSTA et al., 2010; GEBER et al., 2014; BARBOSA et al., 2015; PANTANO et al., 2016; WEBER et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015), resultando na deterioração da qualidade das águas (GUEDES et al., 2012).

Sob essa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo modelar o comportamento de nitrogênio e fósforo em um sistema de recursos hídricos

inserido na região do alto curso do rio Piranhas-PB. O sistema estudado compreende rios e reservatórios, juntamente com a integração dos mesmos a áreas fertilizadas localizadas em seu entorno.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo desenvolvido foi estruturado em duas etapas basilares; são elas: modelagem de nitrogênio e fósforo nas áreas agrícolas e nos corpos hídricos. Como será descrito nos itens ulteriores, a sequência dos procedimentos matemáticos destacados não torna a etapa seguinte independente da anterior; por exemplo, a concentração de nitrogênio ou fósforo em um reservatório de certo influenciará no balanço de massa em uma área agrícola irrigada com a sua água.

2.1 Modelagem de nitrogênio e fósforo nas áreas agrícolas

A modelagem de nitrogênio e fósforo nas áreas agrícolas foi realizada a partir da aplicação de um balanço de massa, em nível mensal, levando em consideração os principais fluxos de entrada e saída de tais macronutrientes no solo.

Para o cálculo da deposição atmosférica mensal de nitrogênio em um perímetro ou área irrigada j no mês t , $NDA_{j,t}$, em quilogramas por hectare, é utilizada a Eq. 1, proposta pela FAO (2003), onde $P_{j,t}$ corresponde à precipitação média mensal na área agrícola j no mês t (mm.mês^{-1}).

$$NDA_{j,t} = 0,14 \times P_{j,t}^{0,5} \quad (1)$$

O cálculo da contribuição de nitrogênio pela água de irrigação (NI), em Kg.ha⁻¹, é realizado por meio da Eq. 2.

$$\sum_{i=1}^{Nc} NI_{i,j,t} = \frac{Q_{i,j,t} \times \left(\frac{CNT_{i,j,t-1}}{1000} \right) \times Nsm_t}{A_{i,j,t}} \quad (2)$$

Sendo $Q_{i,j,t}$ a vazão para suprimento hídrico da cultura i, na área agrícola j, retirada do nó s do

sistema no mês t (m³.s⁻¹); $CNT_{s,i,j,t}$ a concentração de nitrogênio total presente da vazão de irrigação, retirada no nó s do sistema, destinada a atender à cultura i na área agrícola j e no mês t (g.m⁻³); Nsm_t é o número de segundos no mês t; $A_{i,j,t}$ a área onde está sendo cultivada a cultura i, na área agrícola j e no mês t (ha).

Para o cálculo da quantidade mensal de nitrogênio perdida pela lixiviação, em Kg.ha⁻¹, é utilizada a Eq. 3, desenvolvida pela FAO (2003).

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{Nc} NRL_{i,j,t} = & 0,1917 + P_{j,t} \times \left\{ \left(0,0021 + 0,0007 \times \sum_{i=1}^{Nc} F_{i,j,t} \right) \right\} + 0,3 \times \left(\sum_{i=1}^{Nc} EN_{i,j,t} \right) \\ & - 0,10 \times \sum_{i=1}^{Nc} NRC_{i,j,t} \end{aligned} \quad (3)$$

Onde $RNL_{i,j,t}$ representa o nitrogênio perdido por lixiviação na área onde está sendo cultivada a cultura i, na área agrícola j e no mês t (Kg.ha⁻¹); F é um fator relacionado à fertilidade do solo onde está sendo cultivada a cultura i, na área agrícola j e no mês t (para as áreas de estudo, possui valor igual a 2, típico de regiões com fertilidade mo-

derada); $E_{Ni,j,t}$ são as entradas de nitrogênio correspondentes a cultura i, no perímetro ou área agrícola j e no mês t (Kg.ha⁻¹).

O cálculo das perdas de nitrogênio por formas gasosas (NO₂, N_o e NH₃) é efetuado por meio Eq. 4 (FAO, 2003):

$$\sum_{i=1}^{Nc} NRPG_{i,j,t} = Cd + 0,2083 \times \sum_{i=1}^{Nc} F_{i,j,t} + 0,3 \times \left(\sum_{i=1}^{Nc} EN_{i,j,t} \right) - 0,1 \times \sum_{i=1}^{Nc} NRC_{i,j,t} \quad (4)$$

Sendo $NRPG_{i,j,t}$ o nitrogênio removido por perdas gasosas na localidade onde está sendo cultivada a cultura i, na área agrícola j e no mês t (Kg.ha⁻¹); Cd a constante de desnitrificação, com valor de 0,9167 Kg.ha⁻¹ para áreas irrigadas.

A determinação da quantidade mensal de fósforo proveniente da precipitação atmosférica em um pe-

rímetro ou área irrigada j no mês t, $PDA_{j,t}$ é calculada por meio da Eq. 5, estabelecida pela FAO (2003).

$$PDA_{j,t} = 0,053 \times P_{j,t}^{0,5} \quad (5)$$

O procedimento matemático para o cálculo da entrada de fósforo no solo pela água de irrigação

foi similar ao efetuado para o nitrogênio (Eq. 2), apenas levando em consideração a concentração do respectivo elemento presente na água.

Como as formas de fósforo presentes no solo possuem baixa mobilidade, as perdas desse nutriente pelo processo de lixiviação são ínfimas, podendo ser desprezadas (ZONTA et al., 2014). Desta forma, a parcela correspondente à perda de fósforo por lixiviação não é computada no modelo.

No balanço dos nutrientes no solo também é possível considerar o acúmulo dos mesmos, esta última parcela ocorrendo quando não foram observadas vazões superficiais nas áreas agrícolas.

Como dados de entrada, o modelo demanda que sejam fornecidas as vazões geradas nas áreas agrícolas. As concentrações de nitrogênio e fósforo presentes no escoamento superficial podem ser definidas a partir de dados observados no local de estudo (por meio de análises laboratoriais) ou, caso os mesmos não estejam disponíveis, estabelecidas a partir da literatura especializada.

2.2 Modelagem de nitrogênio e fósforo nos corpos hídricos

Nos corpos hídricos, as seguintes considerações gerais fundamentam os procedimentos matemáticos do modelo proposto: o modelo permite integrar reservatórios e rios; para os reservatórios, o modelo hidráulico considerado foi o de mistura completa (já para os rios foi adotado o fluxo em pistão); as reações envolvem cinética de primeira ordem, ou seja, a taxa de reação é diretamente proporcional à concentração do reagente; os coeficientes cinéticos foram corrigidos em função da temperatura; para as cargas poluidoras, os lançamentos das cidades foram considerados pontuais.

Para a modelagem de nutrientes nos reservatórios, é realizado um balanço de massa em nível mensal, considerando os mecanismos e as reações de conversão para cada nutriente estudado. Por meio da Eq. 6, baseada na equação utilizada por Larentis; Collischonn; Tucci (2008), é possível visualizar o balanço de massa empregado para os reservatórios.

$$\frac{dC_{c,r,t}V_{r,t}}{dt} = \left(\sum_{c=1}^n C_{c,t} \times Q_{r,t} + \sum_{c=1}^n C_{c,r,t} \times V_{r,t} \times K_{c,r,t} + \sum_{c=1}^n \frac{S_{c,r,t}}{H_{r,t}} \right) - \left(\sum_{c=1}^n Q'_{r,t} \times C_{c,r,t} + \sum_{c=1}^n C_{c,r,t} \times V_{r,t} \times K'_{c,r,t} \right) \quad (6)$$

Sendo $C_{c,r,t}$ a concentração do constituinte c no reservatório r e no mês t ; $V_{r,t}$ o volume do reservatório r no mês t ; $Q_{r,t}$ a vazão que proporciona entrada de um constituinte c ao reservatório r no mês t ; $C_{c,t}$ a concentração do constituinte c na vazão afluente ao reservatório r durante o mês t ; $K_{c,r,t}$ o coeficiente que representa a entrada de um constituinte c na massa líquida do reservatório r por meio de uma reação de conversão no mês t ; $S_{c,r,t}$ o coeficiente relacionado à entrada de um constituinte c na massa líquida do reservató-

rio r por meio da liberação do sedimento de fundo no mês t ; $H_{r,t}$ a profundidade do reservatório r no mês t ; $Q'_{r,t}$ a vazão defluente do reservatório r no mês t ; $K'_{c,r,t}$ o coeficiente que representa a saída de um constituinte c da massa líquida do reservatório r em um mês t por meio de conversão, sedimentação ou outras formas.

A modelagem do nitrogênio nos rios é efetuada por meio do seguinte sistema de Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs):

$$\frac{dN_{org_c}}{dt} = -K_{oa_c} \times N_{org_c} - K_{so_c} \times N_{org_c} \quad (7)$$

$$\frac{dN_{amon_c}}{dt} = K_{oa_c} \times N_{org_c} - K_{an_c} \times N_{amon_c} + \frac{S_{Namon_c}}{H_c} \quad (8)$$

$$\frac{dN_{nitrito_c}}{dt} = K_{an_c} \times N_{amon_c} - K_{nn_c} \times N_{nitrito_c} \quad (9)$$

$$\frac{dN_{itrato}}{dt} = K_{nn_c} \times N_{nitrito} \quad (10)$$

Sendo N_{org_c} a concentração de nitrogênio orgânico no trecho de rio c ($mg.L^{-1}$); K_{oa_c} o coeficiente de conversão de nitrogênio orgânico para amoniacal ($mês^{-1}$); K_{so_c} o coeficiente de remoção de nitrogênio orgânico por meio da sedimentação ($mês^{-1}$); N_{amon_c} a concentração de nitrogênio amoniacal no trecho de rio c ($mg.L^{-1}$); K_{an_c} o coeficiente de conversão de amônia a nitrito no trecho de rio c ($mês^{-1}$); S_{Namon_c} o coeficiente de liberação de amônia pelo sedimento de fundo no trecho de rio c ($g.m^{-2}.mês^{-1}$); H a profundidade do trecho de rio c (m); $N_{nitrito_c}$ a concentração de nitrito no trecho de rio c ($mg.L^{-1}$); K_{nn_c} o coeficiente de conversão do nitrito a nitrato ($mês^{-1}$); N_{itrato_c} a concentração de nitrato no trecho de rio c ($mg.L^{-1}$).

Já em relação ao fósforo, as Eq. 11 e 12 correspondem à modelagem desse nutriente nos rios.

$$\frac{dP_{org_c}}{dt} = -K_{oi_c} \times P_{org_c} - K_{spo_c} \times P_{org_c} \quad (11)$$

$$\frac{dP_{inorg_c}}{dt} = K_{oi_c} \times P_{org_c} + \frac{P_{Pinorg_c}}{H_c} \quad (12)$$

Sendo P_{org_c} a concentração de fósforo orgânico no trecho de rio c ($mg.L^{-1}$); P_{inorg_c} a concentração de fósforo inorgânico no trecho de rio c ($mg.L^{-1}$); K_{oi_c} o coeficiente de conversão de fósforo orgânico a fósforo inorgânico para o trecho de rio c ($mês^{-1}$); K_{spo_c} o coeficiente de remoção do fósforo orgânico por sedimentação ($mês^{-1}$).

A concentração de nitrogênio ou fósforo total em um determinado trecho de rio estudado corresponde ao somatório das respectivas frações nitrogenadas e fosfatadas consideradas. Por meio de uma média ponderada entre as vazões e concentrações presentes em um trecho de rio r, juntamente com as cargas e vazões afluentes, são calculadas as concentrações iniciais de nitrogênio e fósforo para cada trecho de rio.

A solução dos sistemas não lineares de EDOs é obtida a partir de uma rotina elaborada em ambiente Matlab® com aplicação do método numérico de Runge-Kutta de 4ª ordem. Todas as etapas matemáticas destacadas foram estruturadas e desenvolvidas em ambiente Matlab®.

Após a discretização de todas as etapas que integram a estrutura do modelo de simulação, na Fig. 1 está presente o fluxograma com a sua esquematização geral, destacando a interação das áreas agrícolas com os corpos hídricos. Todo o modelo apresentado foi estruturado e desenvolvido em ambiente Matlab®.

Figura 1 - Fluxograma geral das etapas de modelagem.

2.3 Área de estudo

O sistema estudado integra os reservatórios ligados em série Engenheiro Ávidos, localizado no município de Cajazeiras, e São Gonçalo, localizado no município de Sousa, ambos presentes no estado da Paraíba (entre as latitudes 6°50' e 7°25' Sul e entre as longitudes 38°10' e 38°40' Oeste). Os mesmos estão totalmente inseridos em clima semiárido, com grande variabilidade intra-anual, ou seja, chuvas concentradas em poucos meses no ano.

As Fig. 2 e 3 compreendem os layouts quantitativo e qualitativo do sistema estudado. São evidenciadas as respectivas demandas hídricas, que correspondem ao abastecimento humano e agrícola, além das vazões afluentes (Qaf1, Qaf2

e Qaf3), entradas por precipitação direta sobre os reservatórios (P1 e P2) e saídas por evaporação (Ev1 e Ev2). Em relação aos efluentes (layout qualitativo), foram consideradas as cargas domésticas e agrícolas, incluindo as provenientes do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG).

A aplicação do modelo proposto no sistema de estudo ocorreu a partir de dois Cenários distintos. Para o primeiro (Cenário 1), foram consideradas cargas poluidoras apenas as contribuições dos esgotos domésticos dos municípios. Já no segundo (Cenário 2), foram incrementados os aportes de nitrogênio e fósforo das áreas agrícolas, junto com os efluentes domésticos. O período de simulação adotado foi de 120 meses, ou 10 anos.

Figura 2 - Layout quantitativo do sistema.

Figura 3 - Layout qualitativo do sistema.

2.4 Dados de entrada do modelo

O cálculo do volume dos reservatórios e da vazão nos trechos dos rios estudados foi realizado por meio da utilização do modelo de otimização multiobjetivo baseado em programação linear desenvolvido por Santos et al., (2011). O respectivo modelo permite alocar de maneira otimizada água e terras aptas ao plantio. Desta forma, foram inseridos dados referentes à curva cota x área x volume dos reservatórios (ANA, 2016), dados hidrometeorológicos (ANA, 2016) e demandas hídricas do sistema estudado. As demandas agrícolas foram definidas por meio dos dados de outorga para as áreas irrigadas de estudo, com exceção do PISG, em que foi realizado um balanço hídrico no solo (SANTOS et al., 2011). As culturas agrícolas cultivadas foram coco, banana, goiaba, mandioca e milho, com dados de produtividade média de acordo com a Produção Agrícola Municipal: Culturas Temporárias e Permanentes (IBGE, 2016).

A quantidade de fertilizantes nitrogenados e fosfatados fornecidos a cada cultura foi estabelecida em função dos valores de produtividade, de acordo com as práticas agrícolas da região, ocorrendo de maneira análoga para a fração desses nutrientes removida pelas culturas. Os fertilizantes selecionados foram a ureia (nitrogenado) e o superfosfato simples (fosfatado), devido à maior utilização dos

mesmos na região de estudo e seu significativo emprego para as culturas em questão.

As contribuições per capita de nitrogênio e fósforo presentes nos esgotos domésticos foram definidas de acordo com Von Sperling (2007).

Para a contribuição qualitativa das vazões afluentes aos reservatórios, foram fixados os limites estabelecidos pela resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA Nº 357/2005 para a classe em que os rios são enquadrados. Os trechos de rios contribuintes são enquadrados na Classe 2.

Como condição inicial para as concentrações das formas de nitrogênio e fósforo nos reservatórios foram definidos valores médios fornecidos pela AESA.

Os coeficientes cinéticos de reação, para os dois nutrientes estudados, foram definidos a partir dos valores propostos por Von Sperling (2007) e CHAPRA (1997), para uma temperatura de 20°C.

Para a correção dos coeficientes de reação em função da temperatura da água foram utilizadas medições desse parâmetro físico obtidas junto à Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). Os coeficientes cinéticos de reação foram corrigidos a partir da seguinte expressão:

$$K_{T2} = K_{T1} * \theta^{T2-T1} \quad (13)$$

Em que K_{T1} é a constante de reação para a temperatura 1; K_{T2} é a constante de reação para a temperatura 2, ou 20°C; θ é o coeficiente de temperatura (adimensional).

A definição da velocidade e da profundidade dos trechos do rio foi realizada com base em ajustes, por análise de regressão, das curvas resultantes da fórmula de Manning. A vazão (Q) foi calculada a partir da fórmula de Manning. Em seguida, com a vazão e a área molhada, foi calculada a velocidade. Para a respectiva etapa, foram estabelecidos dois segmentos gerais, são eles: o primeiro entre os dois reservatórios e o segundo a jusante do reservatório São Gonçalo. Na Tabela 1, estão presentes os modelos ajustados para velocidade e profundidade dos trechos dos rios. As áreas estabelecidas para o cultivo de cada cultura, nas localidades onde é praticada a agricultura irrigada, podem ser observadas por meio da Tabela 2.

Dependendo das condições das áreas fertilizadas, as perdas de nitrogênio pelo escoamento superficial ocorrem, principalmente, na forma amoniacal (BOEIRA, 2004). Para o fósforo, predominam formas particuladas. Como a escala temporal corresponde a níveis mensais, é tempo suficiente para a ocorrências de reações de conversão das formas nitrogenadas e fosfatadas. Assim, para os efluentes agrícolas, as concentrações presentes correspondem a nitrato e fósforo inorgânico.

Tabela 1 – Ajuste de profundidade e velocidade em função da vazão.

Trecho	Análise de regressão	R ²
1	$H_{i,r,t} = 0,1112 \times Q_{r,t}^{0,6419}$	0,99
	$V_{i,r,t} = 0,6148 \times Q_{r,t}^{0,3581}$	0,99
2	$H_{i,r,t} = 0,1024 \times Q_{r,t}^{0,6383}$	0,99
	$H_{i,r,t} = 0,1024 \times Q_{r,t}^{0,6383}$	0,99

1 – trecho entre os dois reservatórios; 2 – trecho a jusante do reservatório São Gonçalo; $H_{i,r,t}$: profundidade do trecho i do rio r para o mês t (m); $V_{i,r,t}$: velocidade do trecho i do rio r para o mês t (Km. mês⁻¹); $Q_{r,t}$: vazão para o rio r (m³.mês⁻¹).

Tabela 2 – Área para as culturas nas localidades agrícolas.

Cultura	Áreas estabelecidas para as culturas (ha)		
	ID1	ID2	PISG
Coco	12,4	208,83	2013,4
Banana	17,4	2	501,46
Goiaba	0,7	2	-
Milho	-	1	-
Mandioca	9	-	-

ID1 – irrigação difusa 1; ID2 – irrigação difusa 2.

Para o cálculo da parcela da precipitação que possa resultar em escoamento superficial (precipitação efetiva), incorporando o nitrogênio e o fósforo disponíveis no solo, nas áreas fertilizadas, foi utilizado o modelo SMAP-M, calibrado e validado junto à estação fluviométrica de Piancó (ANA, 2016). Os dados de precipitação utilizados para as manchas agrícolas compreendem os fornecidos pela série histórica do posto pluviométrico de São Gonçalo.

2.5 Representatividade do modelo para com o sistema de estudo

Para verificar o grau de representatividade do modelo para com o sistema de estudo, foram comparados os resultados obtidos por meio da simulação com dados qualitativos dos corpos hídricos fornecidos pela ANA. Tal análise foi efetuada por meio do cálculo do erro relativo (ER), conforme presente na Eq. 14. Dessa forma, quanto menor o valor do ER, mais próximos são os valores simulados dos medidos.

$$ER_i = \left| \frac{CMvar_i - CSvar_i}{CMvar_i} \right| * 100 \quad (14)$$

Sendo $CMvar_i$ a concentração da variável i medida e $CSvar_i$ a concentração da variável i obtida por meio da simulação matemática.

Como os volumes dos reservatórios e vazões nos trechos do rio, dados de entrada necessários para o modelo de simulação proposto, foram obtidos a

partir da utilização da rotina de otimização proposta por Santos et al., (2011), os respectivos valores otimizados podem divergir dos observados; assim, as concentrações dos parâmetros de qualidade de água também seriam distintas. Para que a comparação possa ocorrer de forma fidedigna, foram utilizados dados qualitativos fornecidos pela ANA e as informações quantitativas (volumes dos reservatórios) para o mesmo período, estas últimas disponibilizadas a partir do monitoramento realizado pela AESA. Desta maneira, o modelo de simulação foi aplicado e os resultados foram confrontados com as respectivas medições dos parâmetros nitrogênio e fósforo. Como os dados medidos de nitrogênio e fósforo dizem respeito aos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, os erros relativos foram determinados de acordo com as concentrações simuladas para os respectivos corpos hídricos.

Os dados de qualidade de água utilizados estão compreendidos entre os anos de 2004 e 2011. Como os respectivos dados estão disponibilizados de maneira irregular entre o intervalo temporal em questão, o erro relativo foi calculado apenas para os meses em que se dispunha de informações qualitativas. Para o período simulado, as informações a respeito da quantidade de fertilizantes empregada foram obtidas junto ao International Plant Nutrition Institute (IPNI), que disponibiliza o consumo anual de fertilizantes por região e/ou estado (no presente estudo, foi selecionado o estado da Paraíba).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A vazão defluente dos reservatórios e a variação mensal do volume dos mesmos, resulta-

do da otimização quantitativa, são mostrados nas Fig. 4 e 5, respectivamente. O reservatório Engenheiro Ávidos apresentou vazão defluente em todos os meses (Fig. 4-A), uma vez que é necessário atender às demandas no leito do rio Piranhas, entre os dois reservatórios, e auxiliar o suprimento hídrico das demandas do reservatório São Gonçalo. Como não existe uma demanda a ser atendida a jusante de São Gonçalo, a vazão defluente foi observada em um menor número de meses, ocorrendo, basicamente, por vertimento nos meses com elevada afluência (Fig. 4-B). Os próprios volumes defluentes dos reservatórios, por vertimento e/ou pelo descarregador de fundo, compreendem as vazões dos trechos do rio Piranhas.

Para o reservatório Engenheiro Ávidos, a maior afluência durante os períodos chuvosos, principalmente entre fevereiro e julho, proporcionou um incremento em seu volume (Fig. 5-A). Nos demais meses, é observada redução do volume do reservatório, algo característico dos reservatórios de acumulação, que armazenam água durante os períodos de chuva para efetuar o suprimento hídrico nos meses de maior déficit de precipitação pluvial (ULIANA et al., 2015; GUEDES E COSTA, 2016). Quanto a São Gonçalo, o mesmo possui uma grande dependência da contribuição de Engenheiro Ávidos, apresentando decréscimos importantes em seu volume em curtos intervalos de tempo (inferiores a um ano), principalmente quando a vazão defluente de Engenheiro Ávidos é menor. Também deve ser enfatizada a grande demanda que São Gonçalo deve suprir, com destaque para o PISG.

Figura 4 - Vazão defluente dos reservatórios Engenheiro Ávidos (A) e São Gonçalo (B). **Figura 5** - Variação do volume dos reservatórios Engenheiro Ávidos (A) e São Gonçalo (B).

Na Fig. 6 (de A até L) encontram-se os resultados da modelagem da qualidade da água para os corpos hídricos, no Cenário 1.

É possível observar que o reservatório Engenheiro Ávidos, durante todo o período de simulação, permaneceu com concentrações de nitrogênio e fósforo abaixo do valor máximo permitido pela resolução CONAMA Nº 357/2005 para ambientes lânticos enquadrados na Classe 2 (Fig. 6-A e 6-B). Desta forma, o reservatório em análise apresentou capacidade de diluição suficiente para a manu-

tenção de concentrações de nitrogênio e fósforo em valores abaixo dos limites estabelecidos para a Classe 2, situação que também foi encontrada para o primeiro trecho do rio (Fig. 6-C e 6-D).

Para o segundo trecho (Fig. 6-E e 6-F) e o reservatório São Gonçalo (6-G e 6-H), concentrações acima dos valores permitidos foram observadas nos períodos em que praticamente não existiu diluição dos efluentes, ou seja, escoou, no segundo trecho, esgoto bruto. Nessas situações, os ambientes estão mais vulneráveis a ações antró-

picas. Segundo Von Sperling (2007), o estudo de cursos d'água intermitentes torna-se uma atividade extremamente complexa, necessitando de uma abordagem diferenciada.

Deve ser destacado que São Gonçalo possui menor capacidade de armazenamento se comparado a Engenheiro Ávidos (255 hm³ para Engenheiro Ávidos e 44,6 hm³ para São Gonçalo), assim, nos períodos de menor volume armazenado, correspondentes ao volume morto, os níveis de nitrogênio e fósforo ultrapassaram os limites máximos permissíveis. Durante muitos meses da simulação não existiu vazão a jusante do reservatório São Gonçalo, fato que justifica a ausência de concentrações de nitrogênio e fósforo no terceiro (Fig. 6-I e 6-J) e quarto trecho (Fig. 6-K e 6-L).

Como o reservatório Engenheiro Ávidos e o primeiro trecho do rio Piranhas não sofrem interferência das cargas agrícolas, para o Cenário 2 serão destacados os resultados da modelagem de nitrogênio e fósforo a partir do segundo trecho. Para o Cenário 2, os resultados encontram-se na Fig. 7 (Fig. 7-A a Fig. 7-H).

As contribuições das cargas agrícolas proporcionaram uma elevação dos níveis de nitrogênio e fósforo no reservatório São Gonçalo (Fig. 7-C e 7-D), com maiores valores encontrados nos meses em que o mesmo apresentou menor volume acumulado. Contribuições significativas do segundo trecho do rio Piranhas (Fig. 7-A e 7-B) também foram representativas para o declínio da qualidade da água do reservatório São Gonçalo.

As concentrações das frações de nitrogênio e fósforo no terceiro (Fig. 7-E e 7-F) e quarto trechos (Fig. 7-G e 7-H) do rio Piranhas foram mais elevadas do que as apresentadas no Cenário 1, devido à contribuição indireta das áreas agrícolas 1 e 2, além dos efluentes do PISG, estes últimos impactando diretamente o quarto trecho do rio.

Em grande parte do período simulado, a vazão gerada no quarto trecho do rio foi a própria contribuição do PISG; este, por sua vez, por possuir uma grande área, é responsável por maiores vazões geradas e maior quantidade de nutrientes disponíveis na superfície do solo.

Figura 6 - Concentração de nitrogênio e fósforo no reservatório Engenheiro Ávidos (A e B), no primeiro trecho do rio (C e D), no segundo trecho do rio (E e F), no reservatório São Gonçalo (G e H), no terceiro trecho do rio (I e J) e no quarto trecho do rio (K e L) - Cenário 1.

continua...

Figura 6 - Continuação

Figura 7 - Concentração de nitrogênio e fósforo no segundo trecho do rio (A e B), no reservatório São Gonçalo (C e D), no terceiro trecho do rio (E e F) e no quarto trecho do rio (G e H) - Cenário 2.

Por possuir menor capacidade de armazenamento, o reservatório São Gonçalo também dispõe de inferior potencial de diluição dos efluentes, sendo dependente da vazão liberada pelo reservatório Engenheiro Ávidos. Aliado a esse fato, como o reservatório São Gonçalo é fonte de lançamento contínuo de efluentes, ele se torna vulnerável à deterioração da qualidade de suas águas, junto com os trechos do rio Piranhas. O plano de recursos hídricos da bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016) corrobora as afirmações já descritas e os resultados obtidos já discutidos no presente estudo.

A melhoria do saneamento dos municípios da bacia do Alto Piranhas-PB é uma recomendação assídua nos documentos que formam o plano de recursos hídricos da bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, onde é enfatizada a poluição decorrente da precária infraestrutura de saneamento das cidades, sendo que 0,0% da população do Alto Piranhas é atendida com coleta e tratamento de esgotos domésticos. Desta forma, a construção de unidades de tratamento, de acordo com as condições socioeconômicas da localidade, é algo que deve ser realizado com caráter de urgência, caso contrário, conforme presente no respectivo plano, agravar-se-á a qualidade da água dos corpos hídricos, informação esta que está em consonância com os resultados obtidos no presente estudo, onde foram identificadas situações desfavoráveis do ponto de vista qualitativo, com concentrações de nitrogênio e fósforo superiores aos definidos pela resolução do CONAMA Nº 357/2005 para corpos hídricos enquadrados na Classe 2.

Uma alternativa seria a implantação de sistemas de lagoas de estabilização. Os sistemas convencionais de lagoas de estabilização para cidades de médio e pequeno portes em regi-

ões de clima quente são adequados devido a sua simplicidade, disponibilidade de área, baixo custo operacional, satisfatória remoção de matéria orgânica e qualidade sanitária no efluente final (POSSMOSEER-NASCIMENTO et al., 2014). Além do mais, o efluente final desses sistemas de tratamento pode ser utilizado na própria atividade agrícola, já que tal alternativa se mostra promissora para localidades com déficit hídrico, além da possibilidade de reduzir os custos com fertilizantes industriais (AL GHEETHI et al., 2018).

Já para as áreas fertilizadas, métodos conservacionistas podem ser uma alternativa para controlar a erosão hídrica e, conseqüentemente, reduzir a contribuição de nutrientes para os corpos hídricos.

Os resultados da determinação dos erros relativos para os parâmetros de qualidade de água estudados estão presentes na Tabela 3, na forma de valores médios e máximos. Conforme observado, em termos médios, os erros relativos calculados permaneceram abaixo de 10% (com exceção do parâmetro nitrito para o reservatório São Gonçalo), resultados estes que permitem evidenciar a adequabilidade e a representatividade do modelo proposto para com o sistema estudado, uma vez que as concentrações determinadas pelas rotinas de cálculo ficaram próximas dos valores medidos. Dessa forma, o modelo proposto pode ser uma importante ferramenta para proporcionar melhor gestão e planejamento de sistemas de recursos hídricos a partir da integração de componentes relevantes para a qualidade dos corpos hídricos, além de permitir a análise qualitativa durante diversos meses subsequentes, onde o sistema pode ser avaliado em diversas condições.

Tabela 3 - Valores médios e máximos para o erro relativo correspondente às concentrações de nitrogênio e fósforo dos reservatórios.

Parâmetro	Reservatório	Erro médio (%)	Erro máximo (%)
Nitrogênio Orgânico	Engenheiro Ávidos	5,72	9,21
	São Gonçalo	7,12	9,33
Nitrogênio Amoniacal	Engenheiro Ávidos	4,41	10,05
	São Gonçalo	6,00	8,74
Nitrito	Engenheiro Ávidos	3,22	5,98
	São Gonçalo	15,36	18,70
Nitrato	Engenheiro Ávidos	9,10	13,19
	São Gonçalo	7,87	11,5
Fósforo Total	Engenheiro Ávidos	3,60	7,81
	São Gonçalo	5,37	8,52

4 CONCLUSÃO

O modelo de simulação desenvolvido mostrou-se importante na quantificação da dinâmica comportamental de nitrogênio e fósforo em sistemas de recursos hídricos, possibilitando uma análise integrada dos principais fatores intervenientes nos respectivos ciclos.

O reservatório Engenheiro Ávidos e o primeiro trecho do rio Piranhas não sofreram impactos significativos com os aportes de nitrogênio e fósforo. Tais corpos hídricos, durante todos os meses, permaneceram com concentrações desses macronutrientes abaixo dos valores máximos permitidos para a classe em que os mesmos estão enquadrados.

Dissemelhante situação ocorreu no segundo trecho do rio Piranhas e no reservatório São Gonçalo, que, por serem fonte de lançamento de efluentes agrícolas e domésticos, tiveram elevados níveis de nitrogênio e fósforo, principalmente nos períodos de seca, nos quais os valores ultrapassaram os limites para a classe em que estão enquadrados.

O terceiro trecho do rio Piranhas sofre influência significativa da qualidade das águas do reser-

vatório São Gonçalo; quando as concentrações deste último foram elevadas, muitas das vezes a vazão no trecho em questão também apresentou níveis elevados de nitrogênio e fósforo.

Para o quarto trecho do rio Piranhas, as contribuições dos efluentes do PISG impactaram negativamente a qualidade das águas, principalmente quando a vazão do rio era a própria apresentada pelo PISG.

De maneira geral, o sistema analisado demanda práticas efetivas de planejamento e gestão para que os níveis de nitrogênio e fósforo nos corpos hídricos respeitem os limites estabelecidos pela CONAMA Nº 357/2005. Técnicas conservacionistas para as atividades agrícolas e unidades de tratamento terciário de efluentes são alternativas factíveis para que os objetivos supracitados possam ser atendidos. Para os efluentes domésticos, após o tratamento adequado, o reúso para fins agrícolas é uma possibilidade adequada, que permite a destinação conveniente de tais efluentes e a redução dos custos com fertilizantes.

Os resultados da análise do erro relativo permitiram concluir que, para o sistema estudado, o modelo possuiu boa representatividade, com valores calculados próximos às concentrações medidas para os reservatórios, o que reforça o potencial de aplicação do modelo em sistemas de recursos hídricos, auxiliando, desta forma, nos processos de tomada de decisões para garantir um melhor planejamento e gestão de tais sistemas.

5 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba - FAPESQ, pelo apoio financeiro fornecido ao primeiro autor.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Metodologia: Nepomuceno TC & Santos VS; **Redação - Primeira versão:** Nepomuceno TC, Curi WF e Santos VS; **Redação - Revisões & Edições:** Nepomuceno TC e Curi WF; **Adequação às normas da revista & Elaboração das imagens:** Diniz-Nepomuceno TR e Nepomuceno TC.

7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açú, resumo executivo**. Brasília. 2016.
- AL-GHEETHI, A. A.; EFAQ, A. N.; BALA, J. D.; et al. Removal of pathogenic bacteria from sewage-treated effluent and biosolids for agricultural purposes. **Applied Water Science**, v. 8, n. 2, p. 74, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0698-6>
- BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; AMARAL, A. J. do; WERNER, R. de S. Variáveis hidrológicas e fósforo solúvel na enxurrada em duas formas de semeadura direta com aplicação de dejetos suíno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 14, p. 162-168, 2015.
- BARBOSA, N. C.; ARRUDA, E. M.; BROD, E.; PEREIRA, H. S. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Bioscience Journal**, v. 31, p. 87-95, 2015. <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n1a2015-18196>.
- BRASIL. **Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA)**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. 2017.
- CARDOSO, D. P.; SILVA, M. L. N.; CARVALHO, G. J. de; FREITAS, D. A. F. de; AVANZI, J. C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 632-638, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000600007>
- CHAPRA, S. C. **Surface water quality modeling**. McGraw-Hill, 1997.
- COSTA, V. L.; MARIA, I. C. de; CAMARGO, O. A. de. Transporte de fósforo pela enxurrada em latossolo que recebeu lodo de esgoto. **Bragantia**, v. 69, p. 115-123, 2010. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90816030016>.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **Assessment of soil nutrient balance: approaches and methodologies**. FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin, paper n. 14. Rome. 2003.
- GBLER, L.; BERTOL, I.; BLASL, L. R. de; RAMOS, R. R.; LOUZADA, J. A. S. Fósforo reativo: arraste superficial sob chuvas simuladas para diferentes coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, p. 393-399, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100013>.
- GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D.; ELESBON, A. A. A.; RIBEIRO, C. B. M.; MATOS, A. T.; SOARES, J. H. P. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 558-563, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000500012>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes**, v. 43, 2016.
- KAUFMANN, V.; PINHEIRO, A.; CASTRO, N. M. dos R. Transporte de compostos de carbono, nitrogênio e fósforo pelo escoamento da água em solos agrícolas na região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 75-86, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p75-86>.
- LARENTIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação da Qualidade de Água em Grandes Bacias: Rio Taquari-Antas, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p. 5-22. 2008. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n3.p5-22>
- MONTOVANI, C. P.; POLETTI, E. C. C. Modelagem Matemática da Concentração de Fósforo: Uma Ferramenta para a Gestão dos Recursos Hídricos. **Holos Environment**, v. 13, p. 200-201. 2013. <https://doi.org/10.14295/holos.v13i2.7060>
- OLIVEIRA, J. G. R. de; BARBOSA, G. M. de C.; FILHO, J. T.; TORRES, E. C. Perda de Solo e Água e Riscos Ambientais da Concentração de Nutrientes no Escoamento Superficial em Solo Cultivado no Sistema de Plantio Direto e Submetido a Adubações Orgânicas e Mineral. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 08, p. 093-112, 2015. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.1.p093-112>
- PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, p. 732-740, 2016. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20160086>
- PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 3ª ed. São Paulo: EESC - USP, 2004. 540p.
- SANTOS, V. S.; CURTI, W. F.; CURTI, R. C.; VIEIRA, A. S. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, p. 49-60, 2011. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p49-60>
- VIEIRA, A. S.; CURTI, R. C.; CURTI, W. F.; SANTOS, V. S. Simulação, via Programação Linear Sequencial com Artíficos de Linearização, para Sistema de Recursos Hídricos Parte 1 e Parte 2: Modelo e Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 33-51, 2012. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n1.p33-51>

VIDAL, T. F.; NETO, J. C.; Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 402-407, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000400007>

VON SPERLING, M. **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios**. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2007. 588 p.

WEBER, O. L. dos S.; M. S. O de; SANTOS, C. C. dos; AMORIM, R. S. S.; MOREIRA, R. de O. Nitrogênio e fósforo nas águas provenien-

tes de área de algodoeiro em dois sistemas de cultivos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, p. 186-191, 2016. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v11i3a5383>

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z. N.; MEDEIROS, J. da. C.; SANA, R. S.; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 595-602. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000600005>