

08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## MODELAGEM MATEMÁTICA DO LANÇAMENTO DE EFLUENTES NO RIO PARAÍBA DO SUL NA REGIÃO DA CIDADE DE CAMPOS DOS GOYTACAZES: QUALIDADE DA ÁGUA E ANÁLISE DE OUTORGAS CONCEDIDAS

Mariane Rangel de Matos<sup>1</sup> – mariane.rmatos@gmail.com

Cristine Nunes Ferreira<sup>1</sup> – crisnfer@iff.edu.br

<sup>1</sup>Instituto Federal Fluminense, IFF – Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

**Resumo.** O objetivo deste trabalho foi calibrar o modelo de Streeter-Phelps levando em conta o lançamento de efluentes de algumas outorgas concedidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) na região do rio Paraíba do Sul, vizinhanças de Campos dos Goytacazes. Neste estudo foi considerado os limites máximos e mínimos utilizando a lei CONAMA. Nessa calibração utilizou-se dados da estação de análise da qualidade da água PS441 e para os dados de vazão, foram considerados aqueles fornecidos pela ANA. Foi utilizado o método da regressão linear para estimar a concentração de saturação do poluente do rio, usando os dados de OD em função da temperatura da estação PS441. Com esse trabalho foi possível estudar, através da aplicação do método da regressão linear nos anos de 2014-2017, que o coeficiente de saturação é mais baixo que o ideal. Investigando as outorgas concedidas, verificou-se o comportamento do rio diante de despejos contínuos de efluentes vindos de diversos setores. Constatou-se que esses não são desprezíveis e podem ser os responsáveis pelo valor da concentração de saturação nesses anos. Outras análises foram feitas comparando o montante total de efluente com o lançamento difuso obtendo várias análises interessantes e importantes de serem consideradas na preservação hídrica local.

**Palavras-chave:** Qualidade da água, Modelo de Streeter-Phelps, Outorgas

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a demanda mundial por água é estimada, em torno de 4.600 km<sup>3</sup>/ano, e calcula-se que esta irá aumentar de 20% a 30%, atingindo um volume entre 5.500 e 6.000 km<sup>3</sup>/ano até 2050 (Burek *et al.*, 2016). Este considerável aumento do uso da água em âmbito mundial é devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento econômico, que não tem fundamentos nas premissas do desenvolvimento sustentável, e às mudanças nos padrões de

consumo, dentre outros fatores que colocam a água como um recurso essencial para toda a humanidade.

No Brasil, desde janeiro de 1992, data em que entrou em vigor a Portaria nº 36/GM, que tenta-se encontrar padrões de qualidade da água para consumo humano. Alguns desses padrões ambientais não têm sido utilizados com frequência em programas de vigilância da qualidade das águas destinadas ao consumo humano. Essa é a razão da necessidade imediata de se desenvolver estudos e aplicações que contribuam para conscientizar os diversos autores da necessidade de se solucionar esses problemas, (Abreu *et al.*, 2000).

Avaliações da qualidade da água são baseadas na análise e interpretação de dados analíticos multidimensionais, cuja complexidade demanda o uso de técnicas da análise multivariada, para extração de informações que subsidiem a compreensão do estado atual da qualidade de água, suas tendências e variações temporais e determinantes socioambientais, (Lima *et al.*, 2015).

O enfoque preventivo do controle ambiental se tornou necessário para determinar os efeitos da ação humana sobre a integridade química, física e biológica do meio natural (Fleck *et al.*, 2013). Considerando este contexto, surgem os modelos matemáticos de qualidade da água, como importantes instrumentos de controle da poluição hídrica (Costa & Teixeira, 2010).

Modelos matemáticos de qualidade de água têm sido utilizados como ferramentas para o planejamento e a gestão de recursos hídricos em diversos países. Em geral, em rios, as análises são baseadas em simulações considerando condições de escoamento de regime permanente, (Ferreira *et al.*, 2016). Em 1976 houve uma evolução dos modelos de qualidade da água, com a apresentação dos modelos QUAL-SEMOG, CE-QUAL-W2, QUAL2E, HSPF e MIKE 11, (Reis, 2009).

A escolha de cada modelo matemático depende basicamente de quatro fatores: características particulares do sistema a ser simulado, nível de precisão desejado pelo projeto, dados reais disponíveis para validação do projeto e disponibilidade efetiva de implementação da metodologia, para representar os processos simulados, (Pessanha, 2018). Um dos modelos matemáticos mais utilizados para estudar a qualidade da água levando em consideração a relação entre Oxigênio Dissolvido (OD) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) foi o modelo de Streeter & B. Phelps, (1925). Neste modelo são utilizadas as leis da hidrodinâmica, através das equações de difusão, para estudar a relação entre esses dois parâmetros.

A execução de estudos referentes aos recursos hídricos é o que produz informações capazes de fundamentar os critérios para a gestão da qualidade da água. Estes estudos dependem diretamente das medidas e observações coletadas em campo de forma contínua e precisa. Sem os dados básicos torna-se inviável a representação das características do regime hídrico de qualquer bacia hidrográfica. Ao conjunto de estações de coleta de variáveis hidrológicas dá-se o nome de rede de monitoramento, (Avila *et al.*, 2016).

Deve-se determinar o posicionamento dos pontos que permitirão estabelecer o padrão “natural” da qualidade da água na bacia ou pontos de referência. É importante ressaltar que as estações de controle de qualidade das águas têm limitações referentes à transmissão de dados, uma vez que, dependendo do tipo de monitoramento, amostras precisam ser coletadas e encaminhadas para laboratório para análise e determinação de valores dos parâmetros pesquisados, (Avila *et al.*, 2016). Conforme exposto por Guerra, (2011), a indústria tem tido grande importância na alteração dos padrões de qualidade deste recurso.

Este artigo objetiva contribuir com a construção do diagnóstico ambiental e avaliação da qualidade da água do Rio Paraíba do Sul, mas precisamente na cidade de Campos dos Goytacazes – RJ em que terá um modelo matemático sobre a ação dos efluentes de algumas outorgas aprovadas pela ANA. O estudo poderá servir como base para futuros monitoramentos ambientais.



Tabela 1 - Pontos de lançamento de efluentes definidos para estudo, dados da qualidade da água da PS441 e vazão do rio da estação da ANA 58974000 com vazão de 264 m<sup>3</sup>/s

Item	Outorga	Atividade	C <sub>DBO</sub> (bruto) [mg/L]	C <sub>DBO</sub> (tratado) [mg/L]	V <sub>DBO</sub> [m <sup>3</sup> /h]
1	2017-2023	Indústria	287	47	30
2	2011-2018	Indústria	200	50	4
3	2011-2018	Termoelétrica	3	3	4
4	2017-2041	Sanitário	390	39	670
Total			880	139	708

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Na Fig. 2 temos o mapa com a localização dos pontos definidos para o estudo e da estação de monitoramento PS441. Este mapa foi elaborado através do Google Maps.



Figura 2 - Pontos de estudo e PS441.

Fonte: Autores, 2018

Pode-se observar que os pontos de lançamento de efluentes possuem uma diferença significativa de distância entre eles.

## 2.2 Modelagem matemática

Os parâmetros da qualidade da água deste trabalho são (OD, T e DBO). A dinâmica desses parâmetros respeita as equações de difusão. Neste trabalho foi investigado o comportamento do Oxigênio Dissolvido (OD) com a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), considerando os dados da estação da INEA PS441. Streeter e Phelps usaram as Eq. (1) e Eq. (3) para estudar a relação entre a DBO e o OD. Assumindo-se uma completa e instantânea homogeneização na seção transversal, regime permanente de escoamento e que o transporte difusivo seja de magnitude desprezível, temos a Eq. (1) para DBO, onde  $C_{DBO}$  é a concentração de DBO e  $k_d$  é o coeficiente de remoção de DBO efetiva do rio, com  $k_d$  dado pela Eq. (2):

$$\frac{dC_{DBO}}{dt} = -k_d C_{DBO}, \quad (1)$$

$$k_d = \ln\left(\frac{C_{DBO_0}}{C_{DBO_d}}\right)t_d^{-1} \quad (2)$$

onde  $C_{DBO_0}$  é a concentração de DBO inicial dado pela Tabela 1, considerando o setor produtivo da região,  $C_{DBO_d}$  é a concentração de DBO em  $d$  dias e  $t_d$  é  $d$  dias.

Para OD tem-se a Eq. (2) escrita como Eq. (3)

$$\frac{\partial C_{OD}}{\partial t} = -k_d C_{DBO} + k_r(C_s - C_{OD}), \quad (3)$$

onde  $k_r$  é o coeficiente de reaeração e  $C_s$  é a concentração de saturação do oxigênio. Esta concentração depende da temperatura e pode ser calculada usando os dados da regressão linear que será analisado aqui. O coeficiente de reaeração,  $k_r$ , pode quantificar o processo de transferência de oxigênio da atmosfera para a massa líquida do efluente, (Von Sperling, 2007). Esse parâmetro foi importante para calibrar o modelo. A última demanda bioquímica, DBO total ao final da estabilização, ou DBO remanescente para  $t = 0$  pode ser calculada pela Eq. (4):

$$C_{DBO_0} = \frac{(V \times C_r + V_{ef} \times C_{ef})}{V + V_{ef}} \quad (4)$$

onde  $V$  é a vazão do rio,  $C_r$  é a concentração de DBO no rio, antes do despejo do efluente,  $V_{ef}$  é a vazão do efluente e  $C_{ef}$  é a concentração do constituinte analisado no efluente. A unidade da vazão é em metro cúbico por segundo [ $m^3/s$ ] e a unidade da concentração é em miligrama por litro [ $mg/L$ ].

Desta forma, pelas equações de Streeter-Phelps, pode-se calcular a concentração de DBO, o déficit de OD, e a concentração de OD presente na água.

Procurou-se utilizar dados confiáveis para os estudos de caso realizados neste trabalho. Para isso utilizou-se os dados de Oxigênio Dissolvido (OD), Temperatura (T) e Vazões (V) de agências governamentais brasileiras, responsáveis pelo controle de uso d'água. Os dados referentes as vazões e concessão de outorgas foram extraídos da Agência Nacional de Águas (ANA) e os dados referentes as medições de parâmetros da qualidade da água das estações da INEA, relacionadas na Fig. 1.

### 3. RESULTADOS

Levando em consideração os dados de oxigênio dissolvido da INEA, pôde-se encontrar a concentração de saturação de oxigênio ( $C_s$ ) importante para calibrar o modelo de Streeter-Phelps. Esses dados estão relacionados na Tabela 2, e foram calculados considerando o oxigênio dissolvido em função da temperatura. Essa função foi obtida pelo método da regressão linear (Burian *et al.*, 2007). A estação da INEA considerada foi a PS441 no ano de 2017. Nessa estação obteve-se dados do oxigênio dissolvido e da temperatura, além de outros parâmetros.

Tabela 2 - Método da regressão linear para a estação da INEA PS441

PS441	OD/2014	OD/2015	OD/2016	OD/2017
Regressão Linear	11,37 – 0,15 T	14,87- 0,30 T	11,74 – 0,17 T	7,07+ 0,05 T
R <sup>2</sup>	0,71	1,00	0,95	0,97

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Esses dados experimentais, analisados desta forma podem nos dar informações a respeito da situação anual do rio. Um outro ingrediente importante para validar o modelo teórico é dado pela Lei 357/2005 CONAMA, (Brasil, 2005) que nos fornece informações a respeito da classificação dos rios. Essa classificação está relacionada na Tabela 3.

Tabela 3 - Classes de usos preponderantes de água doce e sua concentração permitida de OD e DBO, respectivamente.

Classe	OD Mínimo (mg/L)	DBO Máxima (mg/L)
Especial	Não são permitidos lançamentos, mesmo tratados	Não são permitidos lançamentos, mesmo tratados
1	6,0	3,0
2	5,0	5,0
3	4,0	10,0
4	2,0	-

Fonte: CONAMA, 2005

Implementando os dados coletados no modelo teórico se pôde validar o modelo, encontrando os valores de  $C_s$ ,  $k_d$  e  $k_r$ . Para ser de acordo com a lei CONAMA, Tabela 3, obteve-se a calibração do modelo de Streeter Phelps para o ano de 2017 como mostra a Tabela 4. Esses dados de calibração foram encontrados considerando os limites máximos para a concentração DBO e o mínimo para o OD, para um Rio Classe 3, pois a estação PS441 se localiza nesta parte do Rio. Calibrou-se o modelo considerando a concentração de efluente máxima para que se respeite a lei CONAMA.

O gráfico da Fig. 3a mostra as curvas de concentração de DBO, o DBO dissolvido em 0,5 dias que corresponde ao mínimo de OD mínimo estipulado pela lei. Em qualquer outro caso usado aqui o ponto de mínimo nos fornece o tempo de decaimento, dado pela Eq. (5):

$$t_d = \frac{1}{k_r - k_d} \ln \left[ \frac{k_r}{k_d} \left( \frac{(C_{OD_0} - C_S)(k_r - k_d)}{k_d C_{DBO_0}} + 1 \right) \right] \quad (5)$$

onde  $k_d$  e  $k_r$  foram dados pelo modelo calibrado e  $C_{DBO_0}$  calculado para cada poluente da Tabela 1 usando a Eq. (4).

Tabela 4 - Dados de calibração para o modelo de Streeter-Phelps nas regiões de estudo calibrado para  $k_d = 3,219 \text{ d}^{-1}$  e  $k_r = 1,5 \text{ d}^{-1}$ .

Item /2017/PS441	Cdbo0(mg/L)	t <sub>d</sub> (d)	Cdbo <sub>d</sub>	V <sub>ef</sub> (m <sup>3</sup> /h)	C <sub>ef</sub> (mg/L)
1	1,009	1,882	0,202	30	287
2	1,001	1,936	0,2	4	200
3	1,274	1,196	0,255	670	390
4	1,000	1,942	0,2	4	3
Total	1,654	0,920	0,331	708	880
Calibração	10	0,500	2	708	1,209 x 10 <sup>4</sup>

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

O gráfico da Fig. 3a podem ser analisado da seguinte forma. No instante igual a zero, a DBO remanescente é total, já que esta se encontra no ponto de lançamento, enquanto que a DBO exercida (oxigênio consumido) é zero, pois ainda não se iniciou a estabilização da matéria orgânica. Com o passar do tempo, esses valores vão se invertendo, a DBO remanescente vai diminuindo até desaparecer por completo. O oxigênio dissolvido inicialmente vai atuando no efluente e vai diminuindo até chegar num ponto crítico e passa a aumentar enquanto a DBO continua a diminuir. Esse ponto crítico pode ser visto no gráfico, que representa o mínimo de OD que um rio classe 3 pode ter para um DBO inicial máximo de 10 mg/L. O DBO de 0,5 dias, ou seja  $C_{DBO(0,5)}$  nos dá a possibilidade de calcular a quantidade de DBO depurada, que ocorre depois de 0,5 dias após o efluente ter sido lançado. Nesse gráfico considerou-se também  $C_s$  através da regressão linear no ano de 2017 que corresponde a estação da INEA PS441.

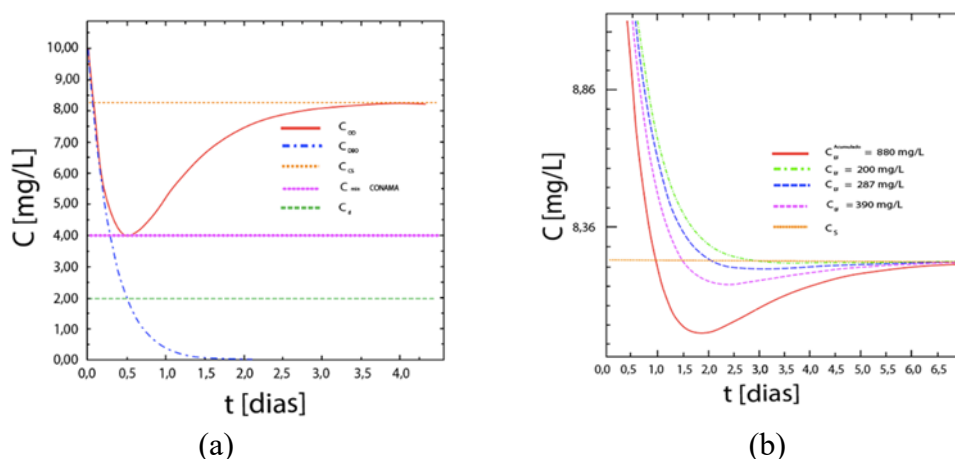


Figura 3 - No gráfico (a) curvas de calibração para estação PS441/2017 do rio Paraíba do Sul, rio classe 3. (b) Comparação dos efluentes lançados na região de estudo mostrada na Fig. 2.

Fonte: Elaborado pelos autores

No gráfico da Fig. 3b comparou-se os efluentes brutos lançados no rio. O procedimento usado nesta comparação, foi manter  $k_r$  e  $k_d$  fixos, calibrado em 3a, com  $C_s$  dado pela regressão

linear da Tabela 2. Nessa comparação incluiu-se o cenário onde todos os efluentes são lançados no mesmo ponto.

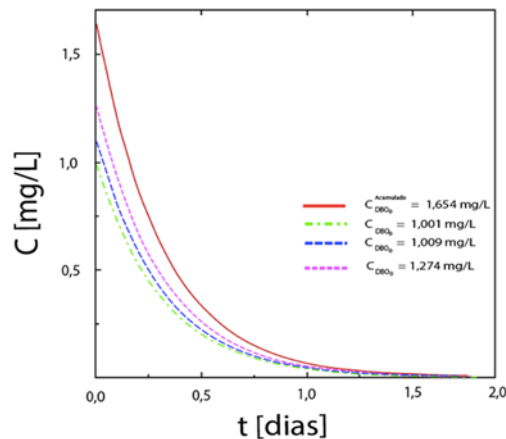


Figura 4 - Relação entre a concentração de DBO e o tempo.  
Fonte: Elaborado pelos autores

No gráfico da Fig. 4, pode ser analisado o comportamento da concentração de DBO para vários casos, com concentrações de DBO variáveis. O lançamento difuso consome menos oxigênio que o lançamento pontual no mesmo ponto. Todos esses lançamentos, tem suas características registradas na Tabela 4. Com auxílio da Eq. (5) pode ser visto que o tempo de decaimento é inversamente proporcional a concentração inicial de DBO dado pela Eq. (4).

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível averiguar que a análise dos parâmetros da qualidade da água é importante para o controle e gestão dos recursos hídricos, além desse fato, também foi possível entender como a modelagem matemática pode ser uma ferramenta valiosa para o entendimento do comportamento do rio, funcionando como uma forma de avaliar e fornecer parâmetros para a sua gestão. Desta forma, antes de se construir uma estação de monitoramento da qualidade da água é necessário analisar os dados existentes para entender o comportamento do rio e a forma de intervenção. Por este motivo utilizamos os dados já coletados da região de estudo e os dados da estação da INEA.

Verificou-se que a utilização de métodos numéricos para a análise dos dados reais é importante para entender o comportamento do rio. Na plataforma da INEA, o foco foi disponibilizar os dados de indicadores da qualidade da água, mas verificou-se, com esse trabalho, que isso não é o suficiente. Além de dados e indicadores é necessário entender a característica do rio e o montante total de efluente lançado. Para este fim é necessário levantar mais dados sobre o montante total e poluentes lançados, incluindo a contribuição vinda das famílias setor agrícola etc. Somente depois deste levantamento, a simulação pode ganhar uma relevância maior no diagnóstico da região de forma a auxiliar a modelagem de diversos cenários envolvendo esses atores.

No entanto, pode-se analisar o impacto dos despejos sistemáticos de efluentes no rio Paraíba do Sul com o modelo de Streeter-Phelps que se mostrou eficiente para o estudo e gestão em rios. Foi possível constatar que o montante de efluentes, outorgados analisados nesse trabalho, não podem ser considerados desprezíveis para a qualidade da água do rio. O motivo vem do fato dos mesmos serem lançados sistematicamente no rio e por um longo prazo, fazendo com que exista uma concentração de saturação de efluente relativamente menor que o ideal.



Esse fato pode ser representado com bastante confiabilidade com o método da regressão linear. No modelo de Streeter-Phelps esse comportamento é refletido no fato do rio não estar retornando para as condições iniciais. Mais características do rio podem ser analisadas com esse modelo, no entanto neste trabalho concentrou-se em algumas outorgas concedidas e considerando o efluente como sendo bruto, ou seja, sem tratamento. Em trabalhos futuros, essas questões serão ampliadas onde um número maior de lançamentos será investigado incluindo o setor das famílias, a agricultura entre outros.

## REFERÊNCIAS

- Abreu, L. M. de, Granemann, S. R., Gartner, I., & Bernardes, R. S. (2000). Escolha de um programa de controle da qualidade da água para consumo humano: aplicação do Método AHP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4(2), 257–262. <https://doi.org/10.1590/S1415-4366200000200021>
- ANA. (2018). Planilha de Outorgas (relatorio\_outorgas). Agência Nacional das Águas. Recuperado de <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/gestao-da-agua/outorga-e-fiscalizacao/principais-servicos/outorgas-emitidas>
- Avila, M., Hora, M., Ávila, C., Alves, F., Faria, M., & Vieira, M. (2016). Gestão qualitativa dos recursos hídricos. Proposta metodológica para o planejamento de uma rede de estações para monitoramento da qualidade de águas superficiais. Estudo de caso: bacia hidrográfica do Rio Muriaé. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(2), 401–415. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p401-415>
- Brasil. (2005). CONAMA N°357, Ministério do Meio Ambiente, RESOLUÇÃO de 17 de Março de 2005. Recuperado de <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>
- Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M. T., Scherzer, A., Tramberend, S., ... Wiberg, D. (2016). Water Futures and Solution - Fast Track Initiative (Final Report) [Monograph]. Recuperado 29 de julho de 2018, de <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13008/>
- Burian, R., Lima, A. C., & Hetem, A. (2007). Cálculo Numérico. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- Costa, D. J. L., & Teixeira, D. (2010). Aplicação de Modelo de Autodepuração para Avaliação da Qualidade da Água do Ribeirão do Ouro, Araraquara-SP. *Revista Brasileira Multidisciplinar - Brazilian Multidisciplinary Journal*, 13(1), 49–62. <https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2010.v13i1.125>
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., & Kaviski, E. (2016). Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente. *RBRH*, 21(3), 479–492. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011615143>
- Fleck, L., Tavares, M. H. F., & Eyng, E. (2013). PRINCIPAIS MODELOS MATEMÁTICOS DE QUALIDADE DA ÁGUA E SUAS APLICAÇÕES: UMA REVISÃO. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, 4(7), 46–61.
- Guerra, A. J. T. (2011). Geomorfologia Urbana. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand.
- INEA. (2018). Boletim de Qualidade da Água (No. 3) (p. 5). INEA. Recuperado de [http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mdi3/~edisp/inea\\_027647.pdf](http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mdi3/~edisp/inea_027647.pdf)
- Lima, C., Zeilhofer, P., Dores, E., & Cruz, I. (2015). Variabilidade espacial da Qualidade de Água em Escala de Bacias - Rio Cuiabá e São Lourenço, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(1), 169–178. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n1.p169-178>
- Pessanha Jr., E. A. (2018). Construção de uma estação de monitoramento da qualidade da água no Rio Paraíba do Sul: Modelagem matemática e comparação de dados (Dissertação de mestrado). Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ.
- Reis, J. S. A. dos. (2009). Modelagem matemática da qualidade de água para o alto rio das Velhas/MG. Recuperado de <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2221>
- Streeter, H. W., & B. Phelps, E. (1925). A Study of Pollution and Natural Purification of the Ohio River (Vol. 140).
- Von Sperling, M. (2007). Estudos e Modelagem da Qualidade da Água (No. 1a ed.) (p. 588). Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

## **MATHEMATICAL MODELING OF THE EFFLUENT RELEASE IN THE PARAÍBA DO SUL RIVER IN THE CITY REGION OF CAMPOS DOS GOYTACAZES: WATER QUALITY AND ANALYSIS OF GRANTED AWARDS**

**Abstract.** *The objective of this work was to calibrate the Streeter-Phelps model taking into account the discharge of effluent from some concessions granted by the National Water Agency (ANA) in the region of the Paraíba do Sul river, near Campos dos Goytacazes. In this study, the maximum and minimum limits were considered using the CONAMA law. In this calibration, data from the PS441 water quality analysis station were used and for flow data, those provided by ANA were considered. The linear regression method was used to estimate the pollutant saturation concentration of the river using the OD data as a function of the temperature of the PS441 station. With this work it was possible to study, through the application of the linear regression method in the years 2014-2017, that the saturation coefficient is lower than the ideal. Investigating the concessions granted, the river's behavior was verified in the face of continuous effluent discharges from various sectors. It was found that these are not negligible and may be responsible for the saturation concentration value in those years. Other analyzes were done comparing the total amount of effluent with the diffuse release obtaining several interesting and important analyzes to be considered in the local water preservation.*

**Key-words:** *Water quality, Streeter-Phelps model, Grants*