

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**

---

# O Processo de Autodepuração do Ribeirão Tatu: Modelagem e Simulações

Elaine Cristina Catapani Poletti<sup>1</sup>

Faculdade de Tecnologia, FT-UNICAMP, Limeira, SP

Amanda de Cassia da Cunha<sup>2</sup>

Doutoranda na Faculdade de Tecnologia, FT-UNICAMP, Limeira, SP

**Resumo.** A contaminação dos mananciais é principalmente consequência das atividades antrópicas, em decorrência dos diversos resíduos gerados e dos lançamentos de efluentes. Diante deste cenário, os rios e outros ambientes aquáticos possuem uma capacidade natural de se recuperarem, denominada potencial de autodepuração hídrica. O objetivo deste trabalho foi o de estudar a capacidade de autodepuração do ribeirão Tatu, Limeira-SP, via modelagem matemática e simulações computacionais. O modelo utilizado é clássico em estudos desta natureza e é conhecido como modelo de Streeter & Phelps. Para a geração dos cenários e análise do comportamento da autodepuração do ribeirão, análises da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e do Oxigênio Dissolvido (OD) foram realizadas. Os resultados confirmam o problema de contaminação do ribeirão em alguns trechos, apresentam a eficiência de remoção de matéria orgânica no manancial, e reforçam a necessidade de controle de descartes para a melhoria de seu enquadramento na legislação vigente.

**Palavras-chave.** Contaminação Hídrica, Modelagem Matemática, Potencial de Autodepuração, Simulações e Geração de Cenários

## 1 Introdução

Atualmente, com os problemas de escassez de água superficial e com os diversos acidentes ocorridos em corpos hídricos, a preocupação acerca da poluição hídrica atinge segmentos não só governamentais, mas também da sociedade civil. É sabido que os principais problemas de contaminação de rios e outros ambientes aquáticos são advindos do escoamento superficial, dos despejos domésticos e industriais, infiltrações decorrentes de processos agrícolas e drenagem urbana. Entretanto, com os grandes períodos de estiagem pelos quais o país tem vivido, tal preocupação extrapola o cunho relacionado à qualidade do recurso e se concentra na quantidade do bem disponível.

Sabe-se que as ações antrópicas poluidoras têm sido incisivas e, quanto menor a disponibilização do recurso nos mananciais, mais enfática é a concentração de poluentes com diversos agravantes, incluindo a redução de seus usos múltiplos, inferiorizando a classe de

---

<sup>1</sup>elainec@ft.unicamp.br

<sup>2</sup>amanda\_cunha1@yahoo.com.br

potabilidade do curso hídrico e dificultando o tratamento de água antes de seu abastecimento.

Entretanto, os próprios corpos aquáticos possuem o potencial de se recuperar, dependendo do lançamento e do cenário de poluição. É a chamada capacidade de autodepuração hídrica, que pode ser entendida como a capacidade natural que os meios aquáticos possuem de eliminar, através de processos físico-químicos e biológicos, os poluentes presentes no meio, devolvendo a potabilidade da água ao longo de seu curso.

Dentro deste contexto, o modelo de Streeter & Phelps tem sido bastante utilizado para entendimento e predição da capacidade de autodepuração de mananciais, relacionando oxigênio dissolvido, associado ao processo de reoxigenação da água, e a Demanda Bioquímica de Oxigênio, associada ao fenômeno de desoxigenação.

## 2 O Modelo Matemático

A modelagem matemática é uma ferramenta computacional que auxilia a geração de cenários e possibilita simulações de diversas situações, favorecendo predições e avaliações acerca de um fenômeno. Associada aos estudos ligados à poluição de cursos hídricos, a modelagem matemática colabora em alguns aspectos, como estudo e subsídio à gestão de incidência de poluentes e análises de comportamentos preferenciais [6].

O estudo da qualidade da água de corpos aquáticos e dos processos de autodepuração, via modelagem matemática, também tem sido fortemente utilizado para projetar situações de poluição no tempo futuro que infligem a sociedade atual, quanto à quantidade de água disponível e à qualidade dos mananciais existentes [2, 5].

Dentre as modelagens matemáticas desenvolvidas, o modelo de Streeter & Phelps possibilita análises do comportamento do elemento oxigênio na água superficial [8].

Com os parâmetros do Oxigênio Dissolvido (OD) e da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), o modelo relaciona a decomposição da matéria orgânica em água com a aeração do oxigênio no meio. Esta análise proporciona o entendimento da capacidade de autodepuração existente nos ecossistemas aquáticos, podendo também ser utilizada para simular o comportamento do oxigênio em tempo estipulado [2, 3, 7].

A formulação clássica do modelo de Streeter & Phelps baseia-se numa equação diferencial, cujo processo surge da conceitualização física do fenômeno de balanço de massas, da mecânica clássica, que estabelece que a taxa de acumulação de matéria = entrada – saída  $\pm$  a reação. Entretanto, supondo um sistema de fluido intacto, o modelo de Streeter & Phelps prioriza o fenômeno da reação considerando o processo de desoxigenação (negativo) e de reaeração (positivo) da mistura. Assim:

$$\text{Taxa de acumulação de matéria} = - \text{desoxigenação} + \text{reaeração}$$

Matematicamente, o modelo de Streeter & Phelps é dado pela Equação ( 1):

$$\frac{dC}{dt} = -K_d L + K_r(C_s - C) \quad (1)$$

com:  $\frac{dL}{dt} = -K_d L$  desoxigenação e  $\frac{dC}{dt} = K_r(C_s - C)$  reaeração.

Onde  $\frac{dC}{dt}$  representa taxa de reaeração do rio dada em mg/L/dia;  $k_d$  indica o coeficiente de desoxigenação em dia<sup>-1</sup>,  $L$  representa a concentração de DBO remanescente em mg/L,  $k_r$  indica o coeficiente de reaeração em dia<sup>-1</sup>,  $C_s$  representa a concentração de oxigênio para a saturação,  $C$  representa a concentração de oxigênio existente em um tempo  $t$  em mg/L; e cuja solução é dada pela equação ( 2):

$$C = C_s - \left[ \left( \frac{K_d L_0}{K_r - K_d} \right) (e^{-K_d t} - e^{-K_r t}) + D_0 e^{-K_r t} \right] \quad (2)$$

com  $D = C_s - C$ .

Ao assumir o caso estacionário, o cálculo do déficit crítico do oxigênio dissolvido, com  $\frac{dD}{dt} = 0$ , é dado por:

$$t_{critico} = \frac{1}{(K_r - K_d)} \ln \left( \frac{K_r}{K_d} \left( 1 - \frac{(K_r - K_d) D_0}{K_d L_0} \right) \right)$$

cuja descrição possibilita análises do tempo em que a concentração de oxigênio dissolvido no meio é máxima.

### 3 O Ribeirão Tatu - Limeira-SP

O ribeirão Tatu nasce em Cordeirópolis-SP e cobre 75% da região urbanizada de Limeira-SP. Na cidade de Limeira, o ribeirão possui uma extensão de aproximadamente de 6,5 quilômetros e 14 afluentes [4]. O ribeirão Tatu caracteriza-se como manancial de velocidade intermediária, nem lântico, nem lótico.

O ribeirão sofre com os lançamentos desde sua entrada, tendo em vista que a cidade de Cordeirópolis descarta o efluente doméstico *in natura* no curso d'água até o momento, de maneira que as águas do Tatu chegam à Limeira com características que o enquadram na classe 4, segundo a resolução CONAMA 357 [1]. Este fato constitui um cenário degradante na entrada do município de Limeira, que perdura por toda a sua extensão marcada pelo mau cheiro e pela aparência desagradável.

O trajeto do manancial no município inicia-se em área rural, segue pela zona central da cidade e depois passa por uma região de concentração de grande número de indústrias. Em seguida, o ribeirão a uma região onde estão localizados uma Estação de Tratamento de Esgoto e um Aterro sanitário, antes de atravessar algumas pequenas propriedades agrícolas e desaguar no rio Piracicaba.

### 4 Materiais e Métodos

Tendo em vista a solução do modelo de Streeter & Phelps, uma implementação em ambiente Matlab foi realizada para a geração dos cenários, bem como análises e discussões da qualidade da água no manancial.

Para a obtenção dos parâmetros, realizaram-se coletas de amostras de água superficial em 3 campanhas, espaçadas ao longo de 2014, em 5 pontos distribuídos ao longo do

ribeirão. As amostras foram analisadas no Laboratório Físico-Químico da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP.

Em termos dos coeficientes, como não foi possível obter um valor experimental para  $K_d$  e  $K_r$ , adotou-se valores presentes na literatura. Para o coeficiente de desoxigenação que é dependente das características da matéria orgânica, além da temperatura e da presença de substâncias inibidoras, assumiu-se, de acordo com [9],  $K_d = 0,35 \text{ dia}^{-1}$ , pois o ribeirão Tatu caracteriza-se como um manancial com descarte de efluente primário. Com relação ao coeficiente de reaeração,  $K_r$  é altamente dependente das características do rio e de sua vazão, principal fator responsável pela introdução de oxigênio no meio líquido, adotou-se, de acordo com [9],  $K_r = 0,55 \text{ dia}^{-1}$  que representa mananciais de profundidade rasa, com velocidade intermitente, entre baixa e média, tal como o ribeirão objeto de estudo. A concentração de saturação de oxigênio foi adotada por  $C_s = 9,2 \text{ mg/L}$ , para ambientes hídricos à temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

Como  $L_0$ , adotou-se o valor de DBO analisado no primeiro ponto de coleta em cada uma das campanhas: 74,53; 84,53 e 28,46, respectivamente; para  $C_0$ , considerou-se o valor de OD analisado no mesmo ponto, também em cada uma das campanhas: 8,1; 7,26 e 7,52 respectivamente; e, finalmente,  $D_0 = C_s - C_0$ . Esses valores foram estimados, considerando-se um limite de DBO de  $10 \text{ mg/L O}_2$ , limite exigido pela legislação para recursos hídricos de classe 3. Ressalta-se que não há especificação para os rios de classe 4. As figuras seguem apresentadas indicando o potencial de autodepuração do ribeirão em cada uma das 3 campanhas de coletas.

## 5 Resultados e Discussões Finais

As Figuras (1), (2) e (3) mostram a capacidade de autodepuração do ribeirão, à partir do primeiro ponto, até a estabilização da DBO, na primeira, segunda e terceira campanhas de coleta, respectivamente.

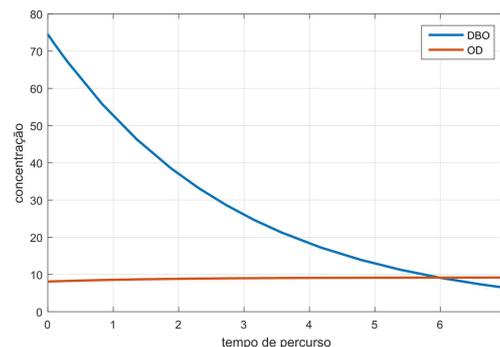


Figura 1: Capacidade de autodepuração do ribeirão na primeira campanha de coleta.

De acordo com a Figura 1, verifica-se que a autodepuração se dá até a estabilização da matéria orgânica (de acordo com o exigido para um manancial de classe 3) em 6 horas de percurso, o equivalente a cerca de 40 quilômetros de percurso da água, na velocidade

do ribeirão Tatu. Com relação à Figura 2, constatou-se a eficiência da autodepuração em 7 horas de percurso, ou seja, cerca de 45 quilômetros de curso d'água.

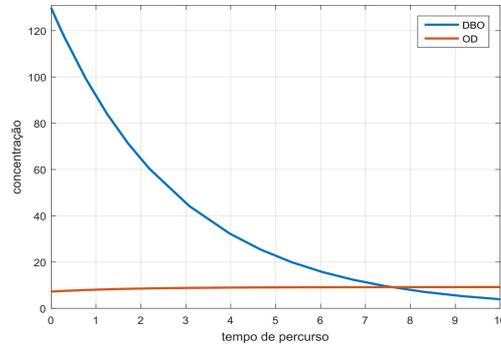


Figura 2: Capacidade de autodepuração do ribeirão na segunda campanha de coleta.

A segunda campanha indicou o maior valor de DBO, seguido pelo mais baixo índice de oxigênio dissolvido, dentre todas as campanhas. Com relação à Figura 3, a carga de DBO no ponto inicial do ribeirão estava mais baixa, e o oxigênio dissolvido normalizado. Portanto, neste caso, a DBO chegou a 10 mg/L O<sub>2</sub> no tempo de percurso de 3 horas, ou cerca de 20 quilômetros de percurso.

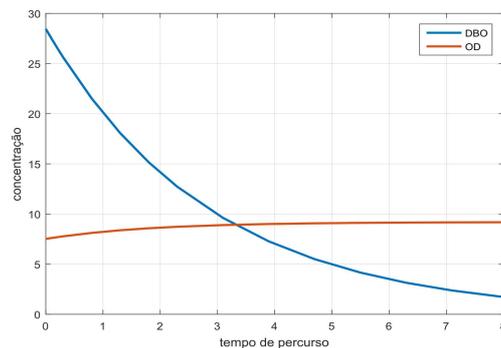


Figura 3: Capacidade de autodepuração do ribeirão na terceira campanha de coleta.

## 6 Conclusões

O ribeirão Tatu apresentou, em relação à autodepuração, no período de estudo, eficiência de remoção de matéria orgânica de até 1,4 mg/L por minuto.

Tanto as análises laboratoriais das coletas de amostra de água superficial quanto as simulações, via modelo de Streeter & Phelps, indicaram fortes indícios de descarte ao longo do ribeirão, desta forma, para que hajam melhoras qualitativas no recurso hídrico, é preciso que tais descartes sejam minimizados.

As três campanhas, realizadas ao longo do ano de 2014, indicaram que o índice pluviométrico possui grande influência na vazão do ribeirão e portanto, na concentração de

contaminantes na água por unidade de espaço. Desta forma, ressalta-se a importância da diminuição das áreas impermeabilizadas no município para que se garanta maior absorção de água pelo solo no entorno do manancial, e de maneira global, que desmatamentos que indiretamente influenciem na pluviosidade do país sejam evitados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo fomento à pesquisa.

## Referências

- [1] BRASIL - CONAMA No357, RESOLUÇÃO de 17 de Março de 2005, Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>.
- [2] C. Fan, C. H. Ko and W. S. Wang, An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation, *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 1824-1832.
- [3] S. E. Jorgensen and B. D. Fath, Fundamentals of Ecological Modelling: Applications in Environmental Management and Research, Ed. Developments in Environmental Modelling of Elsevier, Vol. 23, Cap. 7, Dynamic Biogeochemical Models, 175-227, 2011.
- [4] Limeira. Guia da cidade. <http://www.limeira.sp.gov.br/pml/cidade/guiacidade>. Acesso em: 17 de Outubro de 2014.
- [5] G. Maninna and G. Viviani, Water quality modelling for ephemeral rivers: Model development and parameter assessment, *Journal of Hydrology*, 2010, 393: 186-196.
- [6] E. C. C. Poletti, Dispersão de poluente em sistema de reservatório: modelagem matemática e simulação computacional utilizando-se aproximação numérica e lógica Fuzzy, Tese de Doutorado, UNICAMP, 2009.
- [7] S. Rinaldi and R. Sonsini-Sessa, Sensitivity analysis of generalized Streeter-Phelps models, *Advances in Water Resources*, Vol. 1, no 3, 1978.
- [8] H. W. Streeter and E. B. Phelps, A study of the pollution and natural purification of the Ohio river, United States Public Health Service, *Public Health Bulletin*, no 146, 1925.
- [9] M. Von Sperling, Introdução à qualidades das águas e ao tratamento de esgotos, Belo Horizonte: DESA, 1996. 243p.