

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS UTILIZANDO LINGUAGEM PYTHON – ESTUDO DE CASO DO RIO BARIGUI

*Aline Guidolin da Luz; Caroline Kozak; Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes*

**RESUMO** – Conforme as necessidades ambientais, sanitárias e de saúde aumentaram devido à intervenção antrópica, aumentou-se também a necessidade de despoluição de corpos hídricos, ou mesmo a necessidade de prever o comportamento mediante o lançamento de um novo efluente. Assim, foi desenvolvido um modelo computacional em linguagem Python com base nas equações de Streeter-Phelps, com aplicação para o rio Barigui, Curitiba-PR. O programa representa o rio em trechos, conforme a entrada de novos afluentes, considerado como entradas pontuais. Em virtude da escassez de dados básicos para a modelagem na região da bacia, foi realizada a regionalização de vazões para as entradas pontuais, bem como levantada hipóteses de concentrações de oxigênio dissolvido (OD) e de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), tendo como base pontos de monitoramento pré-estabelecidos. Como resultado, a modelagem de OD e DBO do rio foi comparada aos boxplots das respectivas concentrações medidas em campo. Fazendo a análise desse perfil longitudinal, foram apuradas as concentrações hipotéticas dos afluentes.

**ABSTRACT**– As environmental, sanitary and health needs increased due to anthropogenic intervention, the need for water remediation was increased, or even the need to predict the behavior through the assessment of impact of a new effluent. Thus, the computational modeling in Python of the Streeter-Phelps equations, with application to the Barigui River, in Curitiba-PR, was developed. The program represents the river in sections, according to the entrance of new tributaries, considered as inputs source. Due to the scarcity of basic data for modeling in this case study, the regionalization technique of flow rates for point sources was performed, as well as the hypothesis of dissolved oxygen (DO) and biochemical oxygen demand (BOD) concentrations along the pre-established monitoring points. As a result, the DO and BOD modeling of the river was compared to the boxplots of the respective concentrations measured in the field. Analyzing this longitudinal profile, the hypothetical concentrations of the tributaries were determined.

**Palavras-Chave** – Streeter-Phelps. Qualidade da água. Modelagem computacional.

#### **INTRODUÇÃO**

A Lei 9433/1997 institui a Política Nacional de Recursos, que possui como um de seus objetivos a asseguarção à atual e às futuras gerações a disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos. Dentro dos cinco instrumentos propostos, destacam-se o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água, que por sua vez servem de base na elaboração dos Planos de Recursos Hídricos. Esses, dentre outras coisas, estipulam de metas de melhoria da quantidade e qualidade, e fazem diagnóstico do cenário inicial em que o corpo d'água se encontra.

A quantidade de oxigênio dissolvido (OD) na água e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) são os dois principais parâmetros usados para quantificar a qualidade da água de um rio. Eles são altamente utilizados pelos instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos, onde a resolução CONAMA 357/2005 indica os limites de concentração máximos conforme a classe de enquadramento.

Os modelos de qualidade da água são utilizados como uma ferramenta de gerenciamento hídrico em diversos cenários, seja para monitoramento da qualidade da água, seja para controle, diagnósticos ou hipóteses de comportamentos com a entrada de um novo efluente, ou mesmo com a melhora no tratamento de efluentes já outorgados (BEZERRA, MENDONÇA, e FRISCHKONR 2008). Dos diversos modelos de qualidade da água que permitem a medição e monitoramento de parâmetros dentro do processo de autodepuração, o modelo clássico de OD e DBO de Streeter-Phelps (1925) foi desenvolvido tendo como estudo de caso de recuperação do Rio Ohio nos Estados Unidos, ele foi pioneiro e serviu como base para muitos outros, devido ao fato da simplicidade de aplicação presente no modelo, onde a prioridade é o controle da taxa de oxigênio dissolvido no meio, proveniente do consumo pelos organismos que decompõem a matéria orgânica presente e pela troca gasosa, denominada reaeração, conforme afirma Gotovtsev (2010).

Para tentar recuperar um rio é importante saber o tipo de poluição, em termos qualitativos e quantitativos. Apesar de não englobarem estágios mais críticos, como a fase anaeróbica, as equações de Streeter-Phelps podem ser consideradas como um bom começo para estudo, além de também permitirem adaptações para quantificar outros parâmetros, como taxas de nitrogênio e fósforo. A possibilidade de uma representação mais fiel dos processos, considerando uma maior quantidade de variáveis é contraposta a necessidade de mais dados iniciais.

Isto pode ser visto como um grande limitador para a utilização dos modelos mais complexos, e por isso, o modelo clássico de OD e DBO de Streeter-Phelps (1925) ainda é considerado como um dos mais utilizados, devido a sua boa representação, apesar da simplificação em poucas variáveis, Gotovtsev (2010). Portanto, o objetivo deste trabalho é a aplicação das equações de Streeter-Phelps, para a modelagem dos parâmetros base de qualidade da água, ao longo da extensão do rio Barigui, considerando regime permanente.

## ASPECTOS CONECITUAIS

Dentro de um corpo hídrico ocorre um fenômeno natural denominado de autodepuração. De acordo com Sperling (1996, p.136) esse processo resume-se no “restabelecimento do equilíbrio no meio aquático após as alterações induzidas pelos despejos afluentes”. Em síntese, em um ambiente sem intervenção antrópica, introduções naturais de matéria orgânica no corpo d’água são

naturalmente degradadas pelo rio ao longo do tempo. Contudo, em um ambiente com intervenção antrópica, como um despejo de efluentes doméstico, por exemplo, há aumento significativo no tempo para recuperação do rio.

A Figura 1 ilustra o que ocorre com a quantidade de oxigênio dissolvido no corpo hídrico após o lançamento de matéria orgânica, uma vez que é necessário oxigênio para a oxidação e decomposição da matéria orgânica e para a manutenção da vida aquática (Braga et al., 2002).

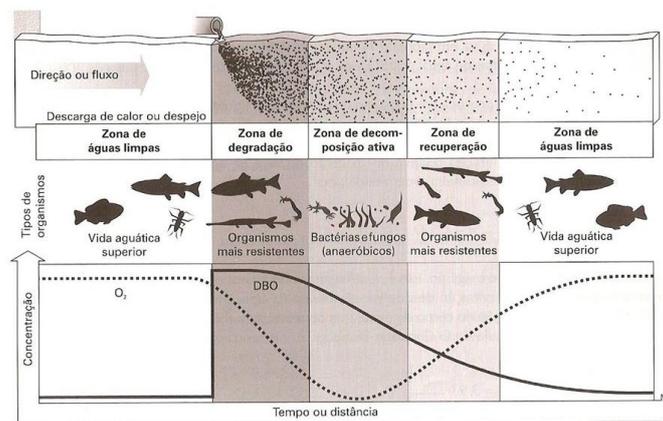


Figura 1 - Processo de autodepuração  
Fonte: Braga et al., 2002.

## MÉTODO

### O Modelo computacional

O programa possui como base as derivadas parciais (1) e (2), que representam, respectivamente, a decomposição da matéria orgânica e a reoxigenação do meio aquático.

$$\frac{dL}{dt} = -k_1 L \quad (1)$$

$$\frac{dD}{dt} = -k_2 D \quad (2)$$

Tomando como partida que o processo de decomposição e reoxigenação ocorrem simultaneamente, bem como a resolução das equações diferenciais, obtém-se as equações de Streeter-Phelps (3) e (4).

$$L = L_0 e^{-\frac{k_1 x}{u}} \quad (3)$$

$$D = \left( \frac{L_0 k_1}{k_2 - k_1} \right) \left( e^{-\frac{k_1 x}{u}} - e^{-\frac{k_2 x}{u}} \right) + D_0 e^{-\frac{k_2 x}{u}} \quad (4)$$

onde L é a DBO última ( $\text{mg.L}^{-1}$ ),  $L_0$  é a DBO inicial ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), D é o déficit de oxigênio ( $\text{mg.L}^{-1}$ ),  $D_0$  é o déficit de oxigênio inicial ( $\text{mg.L}^{-1}$ ),  $k_1$  e  $k_2$  são respectivamente coeficientes de desoxigenação e reaeração ( $\text{dia}^{-1}$ ), x é a distância percorrida (m) e u é a velocidade média ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

A efetiva quantidade de oxigênio na água, OD ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) é dado pela diferença entre a concentração de saturação de OD ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) e o déficit de oxigênio:

$$OD = C_s - D \quad (5)$$

Para o desenvolvimento dessa modelagem foi adotada uma simplificação de que o rio pode ser tratado como vários trechos menores conforme suas características físicas, químicas ou biológicas. Essas características variam desde diferentes seções transversais, mudança de velocidade, diferentes declividades, até novas entradas de cargas, diferentes ocupações do solo, que foram os dois fatores considerados mais significativos para uma representação inicial que fosse mais próxima da realidade.

Dessa forma, para cada novo trecho, será necessário o conhecimento das variáveis denominadas aqui como dados de entrada: velocidade média, vazão, concentração de saturação de oxigênio, concentrações iniciais de DBO e OD, além dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$ .

Sendo assim, o primeiro passo realizado pelo programa é a leitura inicial dos dados de entrada. Em seguida é realizada a mistura de uma entrada, ou seja, mistura de afluente ou efluente com o rio através de uma média ponderada, conforme equação 6:

$$C = \frac{(Q_{rio} * C_{rio}) + (Q_{entrada} * C_{entrada})}{(Q_{rio} + Q_{entrada})} \quad (6)$$

Após a mistura são feitas iterações: aplicam-se as equações de Streeter-Phelps (3) e (4) discretizando o rio de quilômetro em quilômetro até uma nova entrada, e assim repetindo o processo de leitura de dados, mistura e iterações (Figura 2):



Figura 2 - Fluxograma de funcionamento do programa  
Fonte: A autora, 2019.

Ao final, o programa constrói um gráfico contendo simultaneamente as curvas de OD e DBO a cada quilômetro, por toda a extensão do rio.

## Área de estudo

Localizada no estado do Paraná, (Figura 3), e classificada como uma sub-bacia da bacia do Alto Iguaçu pela SUDERHSA (2000), a bacia do rio Barigui possui 279 km<sup>2</sup> de área de drenagem e é uma das mais importantes bacias no município de Curitiba, cortando a cidade de norte a sul.

A nascente do rio Barigui está situada no município de Almirante Tamandaré. O rio percorre 19 km neste município, o que resulta numa área de drenagem de 120 km<sup>2</sup>. Já em Curitiba, o rio estende-se por mais 48 km, totalizando aproximadamente 67 km. Desses 48 km, cerca de 25 km representam a divisa entre as cidades de Curitiba e Araucária. A área de drenagem

correspondente se divide em 144 km<sup>2</sup> referente ao município de Curitiba e 15 km<sup>2</sup> ao município de Araucária.

Fazendo uso do Software livre QGis versão 2.18.17, a bacia do rio Barigui foi observada na sua forma hidrológica, juntamente com o arruamento das cidades de Curitiba e Almirante Tamandaré. O agrupamento dessas informações viabilizou a determinação dos rios tributários que teriam uma maior significância, visto o uso do solo da região.

A Figura 3 também ilustra quais foram as sub-bacias escolhidas como estradas pontuais de mistura no rio, bem como a localização das estações de tratamento de esgoto e os pontos de observação do projeto INTEGRA.

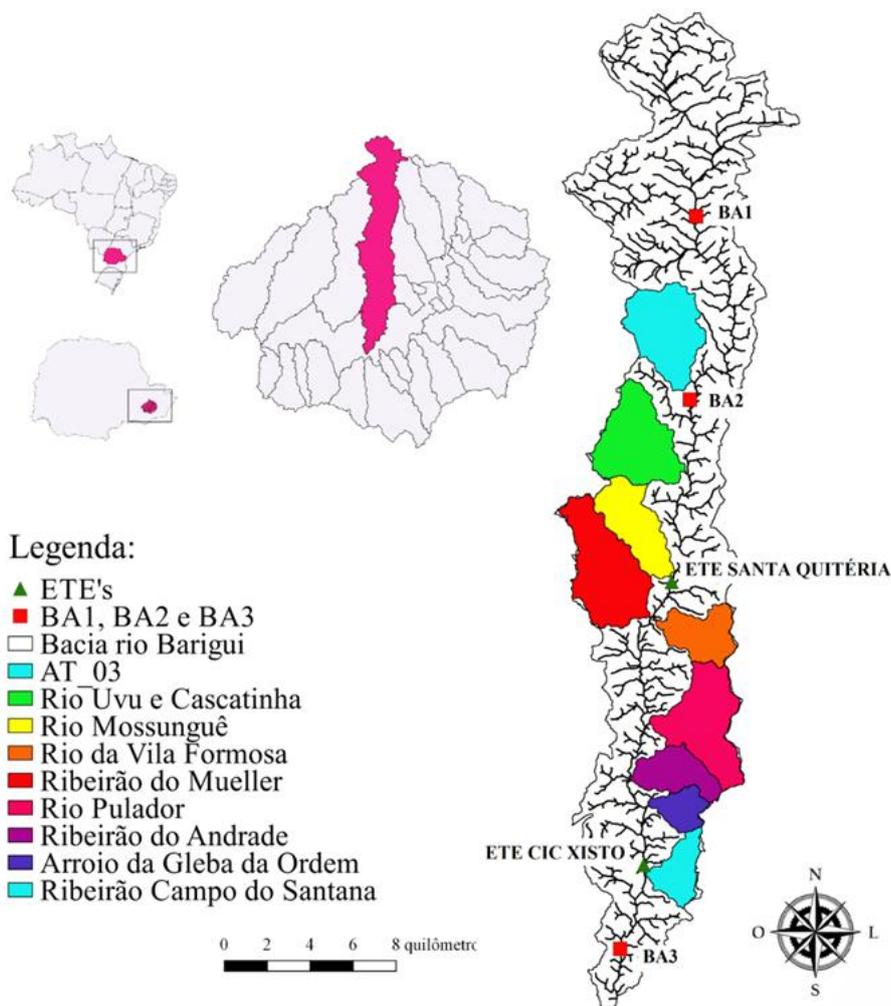


Figura 3 - Bacia do rio Barigui  
Fonte: A autora, 2019.

## Levantamento de dados de entrada

### a) Coeficientes $k_1$ e $k_2$

Em termos dos coeficientes de desoxigenação ( $k_1$ ) e de reoxigenação ( $k_2$ ), serão adotados valores teóricos segundo Fair et al. (1973) e Arceivala (1981), dispostos na Tabela 1 abaixo. Serão realizadas combinações desses valores, conforme a Tabela 2, a fim de verificar a significância da

variação desses valores, tendo como base dados iniciais de vazão, concentrações e velocidades hipotéticos.

Tabela 1 - Valores teóricos de  $k_1$  e  $k_2$  (base e, 20°C)

Origem	$k_1$	Corpo d'água (raso)	$k_2$
Esgoto bruto concentrado	0,45 - 0,35	Pequenas lagoas	0,23
Esgoto bruto de baixa concentração	0,40 - 0,30	Rios vagorosos, grandes lagos	0,37
Efluente primário	0,40 - 0,30	Grandes rios com baixa velocidade	0,46
Efluente secundário	0,24 - 0,12	Grandes rios com velocidade normal	0,69
Curso d'água com águas limpas	0,2 - 0,08	Rios rápidos	1,15

Fonte: adaptado de Fair et al. (1973) e Arceivala (1981).

Tabela 2 - Combinação dos valores teóricos de  $k_1$  e  $k_2$

Combinação	1	2	3	4	5	6
$k_1$ (dia-1)	0.35	0.18	0.14	0.35	0.18	0.14
$k_2$ (dia-1)	0.46	0.46	0.46	0.69	0.69	0.69

Fonte: A autora, 2019.

### b) Vazão e concentrações de OD e DBO dos afluentes

Devido à escassez de dados para caracterizar a bacia inteira, será utilizado o banco de dados do Projeto INTEGRA, o qual possui dados de coletas realizadas em 2012, 2014, 2015 e 2016 para vazão, e concentrações de OD e DBO em 3 pontos: BA1, BA2 e BA3 conforme Tabela 3:

Tabela 3 - Pontos de monitoramento BA1, BA2 e BA3

Ponto	Latitude (S)	Longitude (O)	Área (km <sup>2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	OD (mg.L <sup>-1</sup> )
BA 1	25°18'45"	49°17'43"	41.39	0.93	1.50	7.90
BA 2	25°23'18"	49°18'17"	101.79	SD	4.00	6.25
BA 3	25°36'49"	49°21'24"	251.15	15.06	14.00	2.98

Fonte: A autora, 2019.

As vazões provenientes desse banco de dados servirão como base para realização de regionalização de vazões, técnica que consiste em proporcionalizar a vazão de um determinado ponto, a respectiva área de drenagem. (Tucci, 2002). Será utilizado o valor mediano da vazão no ponto BA3 para determinar a vazão em cada sub-bacia considerada como entrada pontual (Tabela 4), bem como, da vazão a cada quilômetro, por toda a extensão do rio. Já a vazão e concentrações de OD e DBO do ponto BA1 serão adotadas como valores iniciais do rio.

Tabela 4 - Vazões das entradas regionalizadas com base no ponto BA3

Entrada	Área (km <sup>2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
AT3	12.26	0.73
Rio Uvu e Rio Cascatinha	12.89	0.77
Rio Mossunguê	9.02	0.54
ETE Santa Quitéria	-	0.42
Rio da Vila Formosa	6.74	0.40
Ribeirão do Mueller	14.83	0.88
Rio Pulador	13.20	0.79
Arroio do Andrade	6.40	0.38
Arroio Gleba da Ordem	3.64	0.22
ETE CIC Xisto	-	0.60
Ribeirão Campo do Santana	5.01	0.30

Fonte: A autora, 2019.

Para determinação da concentração de OD e DBO em cada sub-bacia, serão testadas hipóteses que consistem em variar de 20 em 20% a concentração do ponto BA3, relativamente à condição inicial até o limite de 200%, conforme Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Variação da porcentagem da concentração de OD e DBO das entradas, tendo como base o ponto BA3

Combinação	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20 <sup>A</sup>
DBO (% BA3)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	200	200	200	200
OD (% BA3)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	20	10	5	10

A:  $k_1 = 0.45$

Fonte: A autora, 2019.

Sendo assim, a combinação 7 indica que as sub-bacias têm 20% da concentração inicial de DBO e 100% da concentração inicial de OD do ponto BA3; a combinação 8 indica que as sub-bacias têm 40% da concentração de DBO e 100% da concentração de OD do ponto BA3; e assim sucessivamente.

### c) Estações de tratamento de esgoto- ETE's

Em paralelo à determinação das sub-bacias, houve um levantamento dos demais contribuintes, considerados como potenciais diminuidores da qualidade do rio Barigui, como indústrias locais e ETE's.

Para determinar a carga de lançamento das ETE's, foi feita uma estimativa observando dados cedidos pela SANEPAR (2005). Segundo Von Sperling (1996), das características químicas do esgoto doméstico bruto, a DBO<sub>5</sub> tem uma concentração típica per capita de 50g.hab<sup>-1</sup>. Ainda, foi realizada a simplificação de que a concentração de OD proveniente das ETE's seria de 10% da concentração de DBO.

Ademais, foi realizada uma estimativa populacional para o ano de 2018, usando o método geométrico com os dados de censos de 1970 a 2010 do IBGE. A Tabela 6 a seguir mostra a base de cálculo realizada para a estimativa do lançamento das ETE's de Santa Quitéria e CIC Xisto.

Tabela 6 - Estimativa da concentração de DBO nas ETE's

Dados	ETE Santa Quitéria	ETE CIC Xisto
Pop. atendida 2005 (hab)	214.118	332.994
Pop. atendida 2018 (hab)	285.054	443.313
Eficiência da ETE (%)	80	85
Q média [L.s <sup>-1</sup> ]	420	600
DBO <sub>5</sub> (Sperling)	50 g.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	
DBO estimada [mg.L <sup>-1</sup> ]	78.553	64.137
OD estimada [mg.L <sup>-1</sup> ]	0.78553	0.64137

Fonte: A autora, 2019.

## RESULTADOS

### Combinações de $k_1$ e $k_2$

Inicialmente, foram realizadas as 6 combinações presentes na Tabela 2, considerando que as concentrações de OD e DBO das entradas são iguais a 100% da concentração do ponto BA3.

Analisando as combinações observou-se dois fatos: i) para  $k_2$  constante, conforme os valores de  $k_1$  diminuem, os valores de OD e DBO aumentam; e ii) para  $k_1$  constante, conforme os valores de  $k_2$  diminuem, os valores de OD diminuem.

Assim, decidiu-se adotar a combinação 4 (Figura 4) que correspondem aos valores de 0.35 para  $k_1$  e 0.69 para  $k_2$ , que representam, respectivamente, efluente primário e grandes rios com velocidade normal. Essa decisão foi baseada nos valores das concentrações de OD no ponto BA3 medidas em campo serem baixas e de que a velocidade no rio estava dentro da normalidade no momento da amostragem.

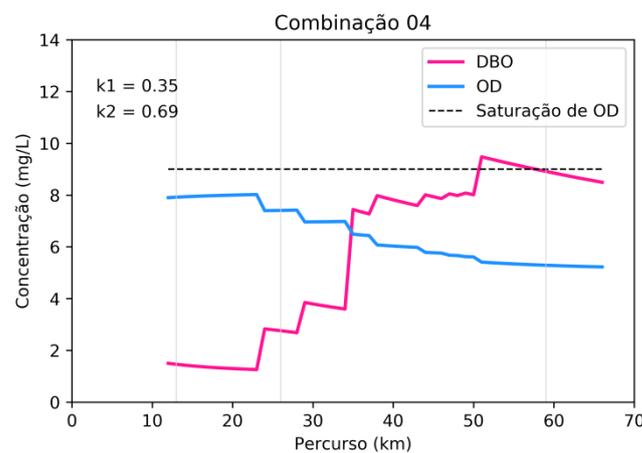


Figura 4 – Combinação 4 das variações de  $k_1$  e  $k_2$   
Fonte: A autora, 2019.

### Combinações das concentrações de OD e DBO das sub-bacias

Com os valores de  $k_1 = 0.35$  e  $k_2 = 0.69$  definidos, foram realizadas mais 14 combinações (Tabela 5) variando as concentrações hipotéticas de OD e DBO das sub-bacias consideradas entradas pontuais.

As 5 primeiras combinações variaram somente a concentração de DBO, considerando as porcentagens de DBO entre 20 e 200%, mantendo OD em 100%, com o objetivo de observar em qual combinação a curva de DBO ficaria mais próxima da mediana dos valores amostrados em campo, representado pelos boxplots.

Merecem destaque 3 combinações. i) (7), por mostrar o rio como não poluído, devido a curva de DBO estar abaixo da curva de OD ao longo de todo o rio; ii) (8), por ser a primeira a representar a poluição, onde as curvas se cruzam e a de DBO passa a ser superior à de OD; iii) (16), que verifica a curva sobre a mediana dos valores de concentrações do BA3, o que implica em afirmar que as concentrações dos afluentes a montante do ponto BA3 o têm valor mediano de 28 mg.L-1 (Figura 5).

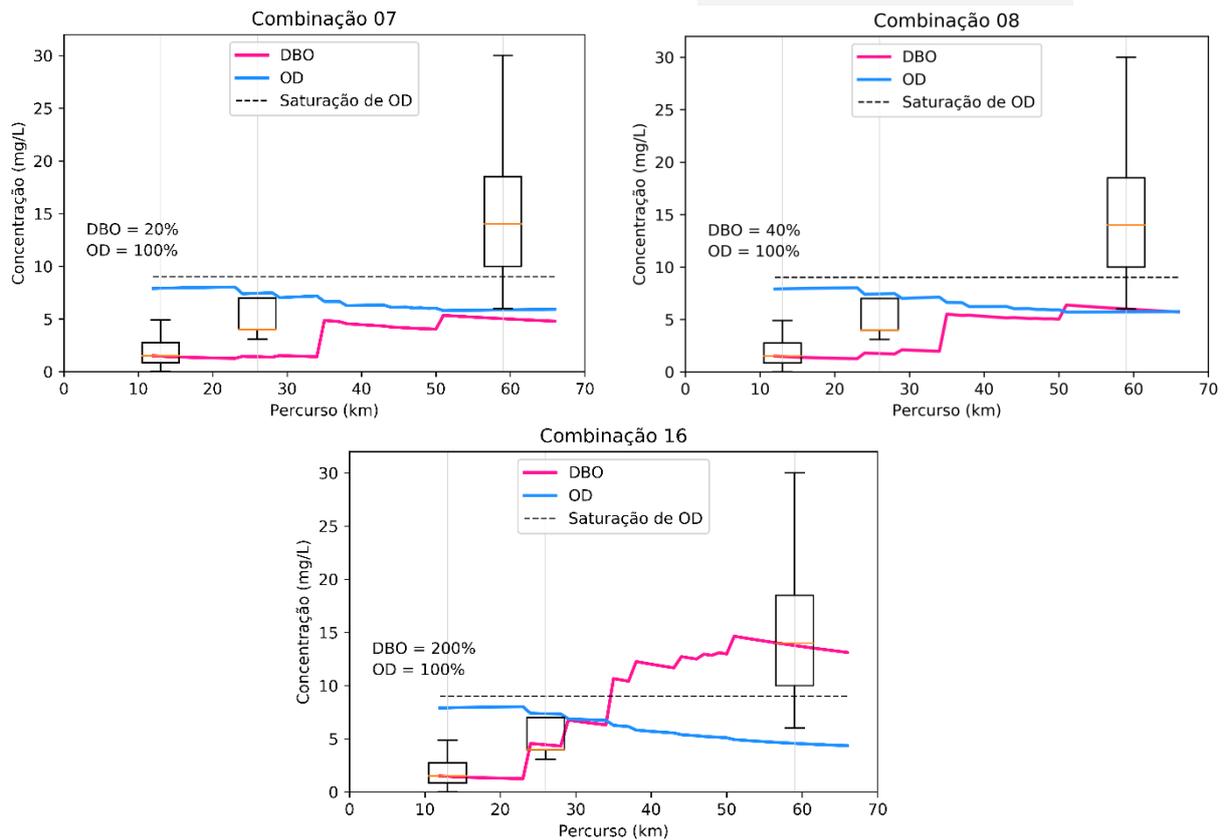


Figura 5- Variação da porcentagem da concentração de DBO das entradas pontuais  
Fonte: A autora, 2019.

Visando calibrar a curva de OD, as combinações seguintes (Tabela 5) variaram a concentração de OD para a concentração de DBO constante em 200%,

Ao longo das combinações observou que como a concentração de OD já estava próxima de zero, não teria diferença significativa continuar diminuindo pela metade a concentração da combinação anterior (Figura 6). Dessa forma, optou-se por testar se a mudança em de  $k_1$  para 0.45 ao invés de 0.35 teria mais impacto (Figura 7), o que pode ser comprovado comparando as combinações 18, 19 e 20.

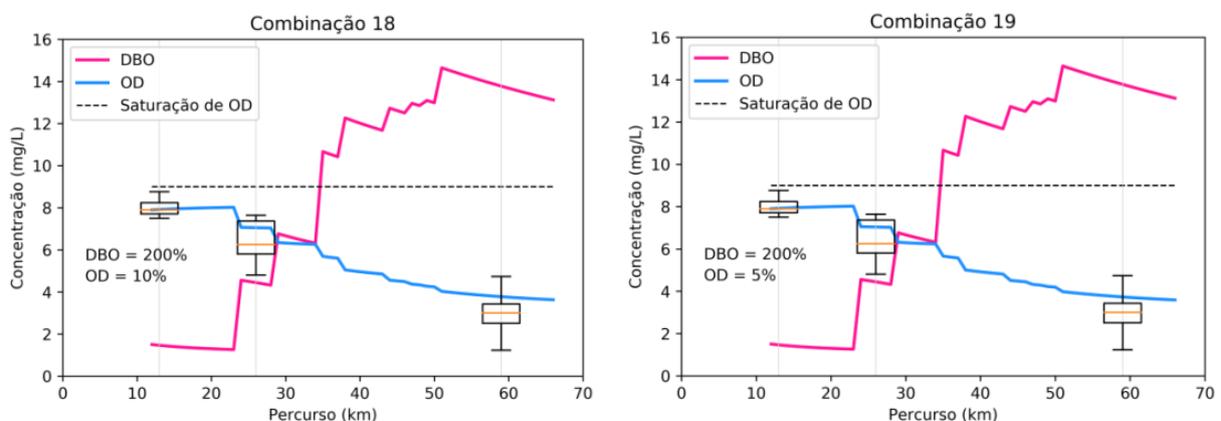


Figura 6 - Variação da porcentagem da concentração de OD das entradas pontuais  
Fonte: A autora, 2019.

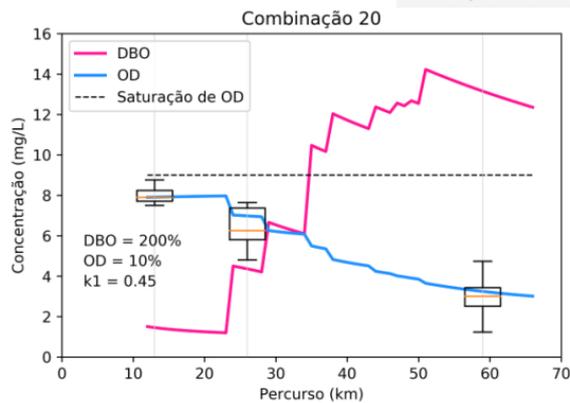


Figura 7 - Variação da porcentagem da concentração de OD das entradas pontuais  
Fonte: A autora, 2019.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto à escolha dos valores de  $k_1$  e  $k_2$ , salienta-se que não se pode afirmar que os valores adotados ( $k_1 = 0.35 \text{ dia}^{-1}$  e  $k_2 = 0.69 \text{ dia}^{-1}$ ) representam o que realmente ocorre no rio, em condições normais, e ainda, de que é recomendado aumentar a quantidade de dados e de variáveis amostradas em campo, a fim de realizar estudo mais aprofundado para estimativa dos valores reais de  $k_1$  e  $k_2$ .

Para fazer a calibração das curvas de OD e DBO passarem pelos respectivos boxplots implicou em considerar que a concentração dos afluentes fosse próxima de zero para OD e em torno de  $28 \text{ mg.L}^{-1}$  para DBO. Recomenda-se verificar, através de medições em campo, se esses valores são condizentes com a realidade dos afluentes, tendo em vista a simplificação adotada de que esses seriam os afluentes que mais impactariam na qualidade da água.

## REFERÊNCIAS

- BEZERRA, I. S.O., MENDONÇA, L. A. R., FRISCHKONR, H. (2008) *Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose*. Revista Escola de Minas. v. 61, n, 2, Ouro Preto
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L. de; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. (2005). *Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável*. Person São Paulo-SP, 318p.
- CHAPRA, S. C. (1997) *Surface Water Quality Modeling*. New York: McGraw-Hill, 844p.
- GOTOVTSEV, A. V. (2010) *Modification of the Streeter-Phelps system with the aim to account for the feedback between dissolved oxygen concentration and organic matter oxidation rate*. Water Resources, n.2, v.37
- SPERLING, Marcos Von (1996) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto*. Minas Gerais. UFMG, 470p.
- TUCCI, Carlos E.M. (2002) *Regionalização de vazões*. Editora da Universidade/UFRGS P.Alegre-RS, 256p.