

SENSIBILIDADE DE CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS NO COMPORTAMENTO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RIO DE PORTE MÉDIO

*SENSITIVITY OF MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE BEHAVIOR OF WATER QUALITY
PARAMETERS IN MEDIUM-SIZED RIVER*

**Marcio Ricardo Salla¹, Ariel Ali Bento Magalhães², Laila Atyna Alves³, Marcio Augusto Reolon
Schmidt⁴, Guilherme de Lima⁵**

¹Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, MG.
E-mail: mrsalla@feciv.ufu.br.

²Engenheira Civil, Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia,
Uberlândia, MG. E-mail: arielali@mestrado.ufu.br.

³Engenheira Civil, Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia,
Uberlândia, MG. E-mail: laila_atyna@hotmail.com.

⁴Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, MG.
E-mail: marcioschmidt@feciv.ufu.br.

⁵Pós-doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia,
MG. E-mail: guilherme_lima@uol.com.br.

RESUMO

Em função da escassez de dados históricos de qualidade da água no território nacional, muitos trabalhos técnicos sobre autodepuração em ambiente lótico estimam os coeficientes de reações bioquímicas a partir de equações empíricas da literatura, as quais têm relação com as características morfológicas e hidráulicas do canal, com a qualidade prévia do curso de água e com a qualidade do efluente lançado. Diante deste cenário, este artigo analisou a sensibilidade de algumas características morfológicas, tais como declividade longitudinal, geometria transversal do canal e rugosidade das paredes laterais e de fundo, no comportamento de OD e DBO₅ em um rio de porte médio, especificamente o rio Uberabinha, Triângulo Mineiro. Foi escolhido um trecho de 33 km deste rio por ser crítico quanto à disponibilidade hídrica e qualidade da água superficial. As simulações mostraram que (i) a variação da seção transversal do canal ocasionou a menor sensibilidade de OD; (ii) a sensibilidade de OD é maior na declividade longitudinal e coeficiente de rugosidade de Manning, que evidencia a importância do trabalho de campo e a não utilização de técnicas menos precisas para determinação dessas características; (iii) não houve discrepâncias acentuadas de DBO₅ para as três características morfológicas.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade, características morfológicas, autodepuração, rio de porte médio.

ABSTRACT

Due to the lack of historical water quality data in the country, many technical papers about the river self-cleaning capacity in lotic environments estimate the biochemical reaction coefficients from empirical equations, which depend on morphological and hydraulic characteristics of the river channel, the quality of the watercourse and the quality of the effluent released in the river. This paper analyzes the sensitivity of some morphological and hydraulic characteristics such as longitudinal slope, cross-section geometry and roughness of the side walls and bottom of the channel, in the concentration change of DO and BOD in a medium-sized river in Minas Gerais Brazil. A reach of 33 km of the Uberabinha River in Triângulo Mineiro has been chosen because its surface water availability and quality are critical for Uberlândia's water supply system. The simulations showed that (i) the variation of the channel cross-section causes the lowest sensitivity in the OD profile; (ii) the sensitivity in the OD profile is larger for the longitudinal slope and Manning roughness coefficient, which shows the importance of field work and not use of inaccurate techniques for the determination of these two characteristics; (iii) there were not significant BOD differences for the three morphological characteristics analysed.

Keywords: Sensitivity analysis, morphological characteristics, self-purification, medium-sized river.

1 – INTRODUÇÃO

A escassez de água com boa qualidade é um dos principais problemas que a humanidade enfrenta no início do século 21. Os maiores conflitos ocorrem em regiões com elevados índices de urbanização, nas quais as elevadas demandas hídricas consuntivas, os lançamentos pontuais de efluentes sem nenhum tipo de tratamento ou com tratamento deficitário e o carreamento superficial difuso de defensivos

agrícolas e fertilizantes comprometem a capacidade de autodepuração natural dos cursos de água.

A modelagem de qualidade da água em ambiente lótico busca diagnosticar e prognosticar o comportamento de parâmetros de qualidade da água dentro da massa líquida. De acordo com De Paula (2011) e Salla *et al.* (2014a), a modelagem matemática permite avaliar os impactos do lançamento das cargas poluidoras e analisar cenários de intervenção e medidas de controle ambiental.

Em todo o mundo existe uma grande quantidade de ferramentas computacionais de uso livre ou não, com complexidades matemáticas distintas, que permitem a simulação de qualidade da água em ambientes lênticos e lóticos (PAREDES-ARQUIOLA *et al.*, 2010; SULIS e SECHI, 2013; ALMEIDA, 2013; SALLA *et al.*, 2014a). De uma forma geral, as ferramentas computacionais utilizam a equação de advecção-difusão na simulação da dispersão de poluentes em curso de água natural, a qual engloba o termo transiente, advectivo, difusivo e fonte (que representa as conversões devido aos processos físicos, químicos e biológicos).

A solução da equação de advecção-difusão é complexa e, a depender do tipo de estudo pretendido, alguns termos são desconsiderados para facilitar a solução analítica ou numérica. Diversas soluções da equação de advecção-difusão são apresentadas na literatura da área, com destaque para os trabalhos desenvolvidos por Ollivier-Gooch e Van Altena (2002), Mello (2005), Liu *et al.* (2007), Ponsoda *et al.* (2008), Zhuang *et al.* (2009), Kumar, Jaiswal e Kumar (2010), Jiang *et al.* (2012), Skiba e Parra-Guevara (2013). Dentre os trabalhos consultados, em função de limitações de dados hidráulicos de campo e da ausência de mapas planialtimétricos, algumas características morfológicas são estimadas a partir de considerações da literatura ou a partir de imagens de satélite de baixa e média resolução.

De acordo com Fragoso Jr., Ferreira e Marques (2009), apesar do avanço conceitual e da capacidade de processamento das ferramentas computacionais atualmente disponíveis, a ausência de dados fluviométricos e de qualidade da água monitorados compromete a confiabilidade a estas ferramentas. Salla *et al.* (2014a) mencionam que a modelagem matemática traduz satisfatoriamente o processo de autodepuração quando os coeficientes de reações bioquímicas são calibrados a partir de dados de qualidade de água monitorados ao longo do trecho de rio estudado.

Em função da escassez de dados históricos de qualidade da água no território nacional, em muitos trabalhos técnicos os coeficientes de reações bioquímicas são estimados a partir de equações empíricas da literatura. Essas equações são amplas e relacionadas com as características morfológicas e hidráulicas do canal, com a qualidade prévia do curso de água, com a qualidade do efluente lançado (VON SPERLING, 2007).

Diante deste cenário, o foco deste artigo científico está na análise de sensibilidade de algumas características morfológicas no comportamento dos parâmetros oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio

(DBO₅) em um rio de porte médio, especificamente o rio Uberabinha - Triângulo Mineiro. As características morfológicas analisadas incluem declividade longitudinal, geometria transversal do canal e rugosidade das paredes laterais e de fundo.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas metodológicas estão descritas nos próximos subitens, incluindo área de estudo, apresentação da equação de difusão-advecção, equacionamento para estimativa dos coeficientes de reaeração natural k_2 e de decomposição da matéria orgânica carbonácea k_d , características hidráulicas do rio, topologia do sistema hídrico e dados de entrada para as simulações e definições das configurações adotadas nas análises de sensibilidade.

2.1 Área de estudo

O rio Uberabinha possui 149,8 km de extensão e suas nascentes localizam-se a noroeste do município de Uberaba, MG, estendendo-se por 15,4 km antes de adentrar no município de Uberlândia, MG. A partir da divisa entre os municípios de Uberaba e Uberlândia, o rio percorre 134,4 km, no sentido sudeste/noroeste, até desaguar no rio Araguari. Para o desenvolvimento deste estudo foi escolhido o médio e baixo curso do rio Uberabinha, em um trecho com início na confluência do rio com o efluente tratado lançado pela ETE Uberabinha e o final nas proximidades da Pequena Central Hidrelétrica – PCH a fio de água Malagone, cuja localização geográfica é ilustrada na Figura 1. Este trecho do rio Uberabinha, com 33 km, permitiu a evolução de todas as fases da autodepuração e foi escolhido por ser crítico quanto à disponibilidade hídrica e qualidade da água superficial, em função de:

- existência de duas elevadas demandas pontuais consuntivas outorgadas junto ao Instituto de Gestão de Águas Mineiras – IGAM para abastecimento público da cidade de Uberlândia-MG, sendo de 2,0 m³/s no ribeirão bom Jardim e de 3,4 m³/s no rio Uberabinha (ver na Figura 1 a localização dessas demandas pontuais);

- lançamento pontual de efluente tratado pela principal Estação de Tratamento de Esgoto - ETE da cidade de Uberlândia (ver na Figura 1 a localização do lançamento pontual de efluente tratado na ETE), com capacidade de tratamento de 95% da carga poluidora gerada na cidade, que contempla uma população aproximada de 629.250 pessoas, conforme IBGE (2015).

Na obtenção dos perfis longitudinais de OD e DBO₅ a partir das Equações [4] e [5], conforme ilustrado na Figura 5, as variáveis temporais foram substituídas pela relação entre a distância percorrida x (discretização de 100 m) e a velocidade média do escoamento U .

Neste contexto, em cada intervalo de discretização de 100 m, foi possível estimar a profundidade líquida média y_m a partir da equação de Manning, mantendo fixo a vazão escoada Q (em m³/s), o coeficiente n de rugosidade (em m^{1/3}.s) e a declividade de fundo I_o (em m/m), conforme a Equação [6].

$$Q.n/I_o^{1/2} = A_m.R_h^{2/3} \quad [6]$$

Na Equação [6], a área molhada A_m e o raio hidráulico R_h dependem da profundidade líquida média y_m . Já a velocidade média do escoamento U , em cada intervalo de discretização de 100 m, foi obtida pela relação entre a vazão escoada Q e a área molhada A_m .

2.3 Estimativa dos coeficientes k_2 e k_d

Os coeficientes de reaeração natural k_2 e de decomposição da matéria orgânica carbonácea k_d foram estimados por meio de equações empíricas disponibilizadas pela literatura da área, que relacionam os coeficientes com algumas características hidráulicas do corpo hídrico, conforme apresentado na Tabela 1. A equação empírica que define o incremento de OD em cascata ou queda livre foi utilizada na estimativa da reaeração na passagem no meio líquido pela Pequena Central Hidrelétrica – PCH Martins.

Tabela 1 – Equações empíricas utilizadas na estimativa de k_2 e k_d (base e, 20 °C) e do incremento de OD em cascata

Coef.	Equação empírica	Faixa de aplicação	Autor
k_2 (dia ⁻¹)	$3,73.U^{0,5}.y_m^{-1,5}$ (em trecho de rio)	$0,6 \leq y_m < 4,0$ m $0,05 \leq U < 0,8$ m/s	O'Connor e Dobbins (1985) <i>apud</i> Von Sperling (2007)
	$5,0.U^{0,97}.y_m^{-1,67}$ (em trecho de rio)	$0,6 \leq y_m < 4,0$ m $0,8 \leq U < 1,5$ m/s	Churchill (1962) <i>apud</i> Von Sperling (2007)
	$5,3.U^{0,67}.y_m^{-1,85}$ (em trecho de rio)	$0,1 \leq y_m < 0,6$ m $0,05 \leq U < 1,5$ m/s	Owens (1976) <i>apud</i> Von Sperling (2007)
	k_d (dia ⁻¹)	$0,3*(y_m/2,5)^{0,434}$ $y_m \leq 2,5$ m	Von Sperling (2007)
	Incremento de OD em cascata	$C_e = C_o + k.(C_s - C_o)$ $k = 1 - 1,09.h^{0,128}$ $y_m^* > 4,0$ m	Von Sperling (2007)

U é a velocidade média no curso de água (m/s); y_m é a profundidade líquida média (m); y_m^* é a diferença entre os níveis líquidos médios a montante e jusante da PCH; C_e é a concentração de OD a jusante da PCH; C_o é a concentração de OD a montante da PCH; k é o coeficiente de eficiência (-); C_s é a concentração de saturação de OD.

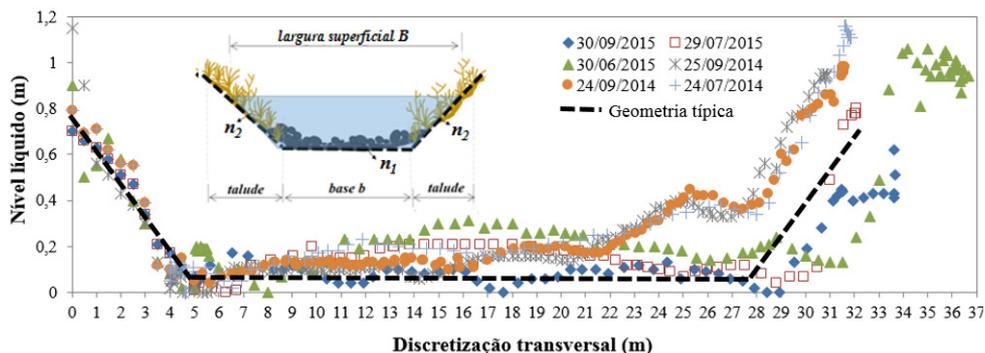
Fonte: Von Sperling (2007)

Nas equações empíricas apresentadas na Tabela 1, a profundidade líquida média y_m foi obtida a partir da Equação [6].

2.4 Características hidráulicas do rio

Trabalhos de campo foram realizados, no período de julho de 2014 até setembro de 2015, para o levantamento batimétrico no rio Uberabinha em uma seção logo a montante do lançamento de efluente tratado pela ETE Uberabinha (ver Figura 2). A geometria típica do rio Uberabinha é trapezoidal, com material da base do canal constituído por basalto e poucos matacões de dimensões reduzidas (n_1 igual a 0,035 m^{-1/3}.s, de acordo com CHOW, 2009) e taludes laterais constituídos por espécies vegetais de porte médio (n_2 igual a 0,065 m^{-1/3}.s, de acordo com CHOW, 2009). Conforme mostrado na Figura 2, a largura de base b do canal na seção avaliada é de 23 m e declividade dos taludes de 45°, sendo esta geometria considerada padrão nas análises de sensibilidade da declividade longitudinal e rugosidades das paredes laterais e de fundo. Para o traçado da geometria típica identificada na Figura 2, considerou-se a tendência trapezoidal da seção transversal e desconsiderou-se as variações mensais de acúmulo de sedimento de fundo.

Figura 2 – Levantamento batimétrico no rio Uberabinha a montante da ETE Uberabinha



2.5 Topologia do sistema hídrico e dados de entrada

Para que fosse possível analisar a sensibilidade das características morfológicas do rio, tais como declividade longitudinal, geometria transversal do canal e rugosidade das paredes laterais e de fundo no comportamento de OD e DBO₅ em ambiente lótico, houve a necessidade de adotar um balanço hídrico e dados de qualidade da água fixos em todas as análises. Neste contexto, foi considerado:

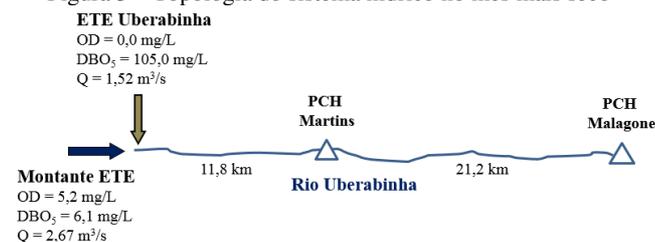
- a vazão no rio Uberabinha para o mês mais seco dentro do período de junho de 2014 até setembro de 2015, que corresponde ao período crítico da capacidade de autodepuração natural do curso de água. As vazões foram medidas por meio do equipamento *Acoustic Doppler Current Profiler* – ADCP, o qual permite uma aquisição mais precisa (erro da ordem de 5%), rápida, com maior qualidade, quantidade de dados e taxa de reprodutibilidade, comparado aos métodos tradicionais de determinação da vazão em canais naturais (SALLA e CHUERUBIM, 2014b; SCHMIDT *et al.*, 2014). Este aparelho faz medições de velocidade do escoamento a partir do efeito *doppler*, transmitindo ondas sonoras na água e quantificando a mudança de frequência presente no eco gerado pelas partículas em suspensão;

- os dados de entrada de OD e DBO₅ no rio Uberabinha (a montante da confluência com o efluente sanitário tratado na ETE Uberabinha) e na saída da ETE, para o mês mais seco no período de junho de 2014 até setembro de 2015;

- não foi considerado nenhum afluente menor no trecho do rio Uberabinha estudado.

A topologia do sistema hídrico considerado e os dados de entrada fixos para o mês mais seco estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Topologia do sistema hídrico no mês mais seco

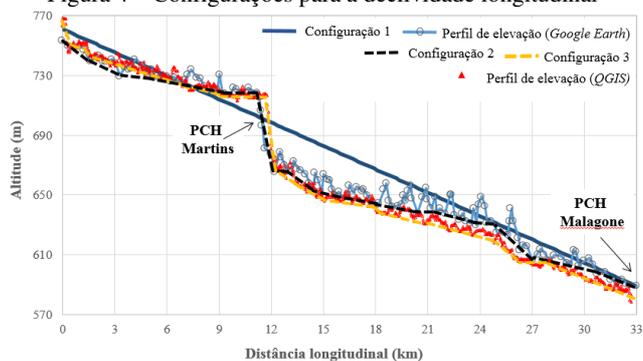


2.6 Análises de sensibilidade

Para cada característica morfológica foram analisadas três configurações, a saber:

- Declividade longitudinal – dados fixos:** seção transversal trapezoidal em todo o trecho (conforme Figura 2), rugosidade obtida pelo método de Cowan (igual a 0,046 m^{-1/3}.s) e discretização espacial de 100 m; **Configuração 1:** declividade média em todo o trecho do rio Uberabinha, com as cotas no início e final do trecho obtidas na ferramenta Google Earth (ver Figura 4); **Configuração 2:** Perfil de elevação obtido na ferramenta *Google Earth* com intervalo de amostragem horizontal de 100 m (ver Figura 4); **Configuração 3:** Perfil de elevação obtido a partir de dados de elevação por interferometria por radar do TOPODATA (INPE, 2015) na ferramenta QGIS com intervalo de amostragem horizontal de 30 m, posteriormente generalizado para 100 m (ver Figura 4).

Figura 4 – Configurações para a declividade longitudinal



Dentre as diversas metodologias para estimar o coeficiente *n* de rugosidade de Manning, o método de Cowan (CHOW, 2009) é muito utilizado, uma vez que considera diversos fatores que influenciam na resistência ao escoamento, tais como: material associado à superfície de contato; irregularidades (erosões, assoreamentos, saliências e depressões na superfície); frequência de variações na seção transversal, analisada segundo as possibilidades de causar perturbações no fluxo; obstruções (deposições de matações, raízes, troncos etc.), avaliados segundo sua extensão no sentido da redução da seção e sua possibilidade de causar turbulência no escoamento; influência da vegetação, avaliada segundo o tipo,

densidade e altura da vegetação nas margens, bem como a obstrução na vazão; grau de meandrização do curso de água, avaliado pela razão entre o comprimento efetivo do trecho e a distância retilínea percorrida.

As imagens de interferometria por radar estão disponíveis no projeto TOPODATA pelo INPE (2015). Estas imagens apresentam resolução espacial de 30 por 30 m. Esses valores de cobertura de pixel são condizentes com um mapeamento na escala 1:40.000. Após tratadas, as imagens apresentam os dados altimétricos confiáveis para médias e grandes escalas.

ii) *Seção transversal do canal – dados fixos*: perfil de elevação obtido com uso da ferramenta QGIS sobre imagens de radar do TOPODATA (ver Figura 4), rugosidade obtida pelo método de Cowan (igual a $0,046 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$), mantendo discretização espacial de 100 m; **Configuração 1**: seção trapezoidal (conforme Figura 2); **Configuração 2**: seção retangular única, com base b igual ao trapezoidal (23 m); **Configuração 3**: seção trapezoidal com largura da superfície B variável em intervalos de 1000 m, obtida na ferramenta *Google Earth*.

iii) *Rugosidade das paredes laterais e de fundo – dados fixos*: perfil de elevação obtido com uso da ferramenta QGIS sobre imagens de radar do TOPODATA (ver Figura 4), seção trapezoidal (conforme Figura 2) e discretização espacial de 100 m; **Configuração 1**: rugosidade obtida pelo método de Cowan (igual a $0,046 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$); **Configuração 2**: Rugosidade n_1 (igual a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ – CHOW, 2009); **Configuração 3**: Rugosidade n_2 (igual a $0,065 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ – CHOW, 2009).

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 5 é mostrada a variação de OD e DBO_5 frente às diversas configurações analisadas para as características morfológicas: declividade longitudinal, seção transversal e rugosidades das paredes laterais e de fundo.

Uma visão geral da Figura 5 mostra que a variação da seção transversal do canal ocasionou a menor sensibilidade no perfil de OD. Para as três características morfológicas simuladas, o único crescimento pontual de OD nas proximidades do quilômetro 11,8 é ocasionado pelo incremento de reaeração na passagem do meio líquido pela PCH Martins. Quanto ao parâmetro DBO_5 , não houve discrepâncias acentuadas para as três características morfológicas.

Na Tabela 2 são mostrados os valores dos coeficientes k_2 e k_d obtidos a partir das equações da literatura (Tabela 1), já corrigidos para a temperatura da água no mês mais seco (igual a 25°C), coeficientes estes utilizados nas simulações.

Almeida (2013), no estudo de oxigenação e desoxigenação de um trecho do rio Uberabinha a montante da ETE para todo um ano hidrológico, alcançou valores de k_d e k_2 nas faixas de $0,02\text{-}0,47 \text{ dia}^{-1}$ e $25,77\text{-}58,14 \text{ dia}^{-1}$, respectivamente. O intervalo de k_d inferior ao obtido neste estudo tem relação com a melhor qualidade da água superficial a montante da ETE. Ainda, o intervalo de k_2 obtido por Almeida (2013) ficou próximo dos valores deste estudo em função da utilização das mesmas equações empíricas na estimativa do coeficiente.

Tabela 2 – Coeficientes k_2 e k_d utilizados nas simulações

Característica morfológica	Coef. (dia ⁻¹)	Config. 1	Config. 2	Config. 3
Declividade longitudinal	k_2	48,47	7,2-89,5 34,6±23,1	12,2-217,7 39,9±26,8
	k_d	0,98	0,71-1,35 0,91±0,13	0,77-1,35 0,93±0,11
Seção transversal	k_2	12,2-217,7 39,9±26,8	11,8-215,5 39,1±26,6	13,5-223,2 73,4±64,8
	k_d	0,77-1,35 0,93±0,11	0,77-1,34 0,93±0,10	0,82-1,64 1,13±0,25
Rugosidade das paredes laterais e fundo	k_2	12,2-217,7 39,9±26,8	18,5-304,9 60,5±38,9	6,5-116,4 21,5±14,7
	k_d	0,77-1,35 0,93±0,11	0,83-1,45 1,01±0,11	0,71-1,24 0,86±0,09
Mínimo-máximo; médio ± desvio padrão				

Os valores similares de k_2 e k_d para a Config. 3 – Declividade longitudinal, Config. 1 – Seção transversal e Config. 1 – Rugosidade das paredes laterais e fundo (indicados em negrito na Tabela 2) é fruto de uma mesma configuração, com: seção transversal trapezoidal em todo o trecho (conforme Figura 2), rugosidade obtida pelo método de Cowan (igual a $0,046 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$), discretização espacial de 100 m e perfil de elevação obtido na ferramenta QGIS (ver Figura 4). Esta configuração, dentre as diversas simuladas, representa a melhor alternativa (aqui denominada por configuração ótima). Como justificativa, de acordo com Salla *et al.* (2014a e 2014c), na modelagem matemática de autodepuração, o comportamento longitudinal de poluente é melhor representado quando as características hidráulicas (seção transversal e perímetro molhado) e as características do escoamento (rugosidade das paredes laterais e de fundo e declividade longitudinal) são medidos em campo ou estimados a partir de metodologia consagrada pela literatura da área.

A análise individualizada de cada característica morfológica permite avaliar a sensibilidade das configurações secundárias frente à configuração ótima. É importante salientar que as configurações secundárias são as mais utilizadas por profissionais inexperientes da área ambiental, uma vez que não necessita de conhecimento avançado sobre Sistema de Informações Geográfica – SIG e não necessita de dados batimétricos e hidráulicos prévios.

Declividade longitudinal

Com relação ao parâmetro OD, apesar da configuração 1 apresentar a mesma tendência de crescimento ao longo do escoamento longitudinal quando comparada às outras duas configurações, a consideração de declividade única ao longo de 33 km (igual a $0,0052 \text{ m/m}$), de certa forma mascara a evolução real do perfil de OD, ou seja, não se deve utilizar declividade longitudinal média constante. Comparando as configurações 2 e 3 (ver Figura 5-a), percebe-se que as maiores discrepâncias na evolução de OD somente ocorrem nos trechos com oscilações acentuadas da declividade longitudinal, em especial entre os comprimentos 3,3 – 9,6 km (média de $0,0019 \text{ m/m}$ na configuração 2 e $0,0046 \text{ m/m}$ na configuração 3) e 18,5 – 25,5 km (média de $0,0016 \text{ m/m}$ na configuração 2 e $0,0031 \text{ m/m}$ na configuração 3). O aumento da declividade

longitudinal acarreta no aumento da velocidade média e turbulências superficiais no escoamento, com consequente interferência no comportamento de OD em função da variação do coeficiente de reaeração natural k_2 .

Esta situação evidencia que a utilização do perfil de elevação obtido na ferramenta *Google Earth* (configuração 2) pode comprometer a qualidade da simulação de OD, em função das limitações desta metodologia frente à ferramenta QGIS.

O perfil de DBO_5 apresentou a mesma tendência de decaimento nas três configurações, com oscilação máxima de 1,5 mg/L das configurações 1 e 2 em relação à configuração ótima 3 (ver Figura 5-a). Dentro da faixa de DBO_5 aqui estudada, a variação do coeficiente de reaeração natural k_2 em função do aumento da declividade longitudinal não gerou oscilações consideráveis na capacidade de decomposição da matéria orgânica carbonácea. Isso mostra que, na simulação de DBO_5 , não existe a necessidade de utilização de uma ferramenta SIG robusta na determinação da declividade longitudinal.

Seção transversal do canal

A variação da seção transversal do canal ocasionou a menor sensibilidade no perfil de OD, em comparação com as outras características morfológicas. A adoção de seção transversal trapezoidal (Configuração 1) e retangular com a mesma largura de base do canal (Configuração 2) geraram perfis de OD muito próximos (ver Figura 5-b). Já na configuração 3, onde foi adotada seção trapezoidal com largura da superfície B variável em intervalos de 1000 m, houve o deslocamento do perfil para cima (máximo de 0,8 mg/L no final dos 33 km – ver Figura 5-b). Mantida a seção transversal trapezoidal (Configuração 3), as elevadas larguras superficiais nas proximidades das PCHs reduzem muito a lâmina líquida, com consequente aumento exagerado de k_2 . Nestas regiões é importante destacar que a seção transversal real é diferente da seção trapezoidal adotada nas simulações, o que compromete a qualidade da simulação.

Com relação a DBO_5 , até 9 km após a mistura das águas do rio Uberabinha com o efluente tratado na ETE Uberabinha, o perfil apresentou a mesma tendência de decaimento nas três configurações, com oscilação máxima de 1,5 mg/L já no final deste trecho (ver Figura 5-b). Isso se deve aos valores próximos de largura do canal utilizados nas configurações.

A partir dos 9 km, em função do represamento da PCH Martins e PCH Malagone, o aumento da largura do canal reduz drasticamente o nível líquido na Configuração 3, com consequente aumento de k_d . Neste caso, o decaimento de DBO_5 chega a, aproximadamente, 10 mg/L em relação às configurações 1 e 2 (ver Figura 5-b).

Rugosidade das paredes laterais e de fundo

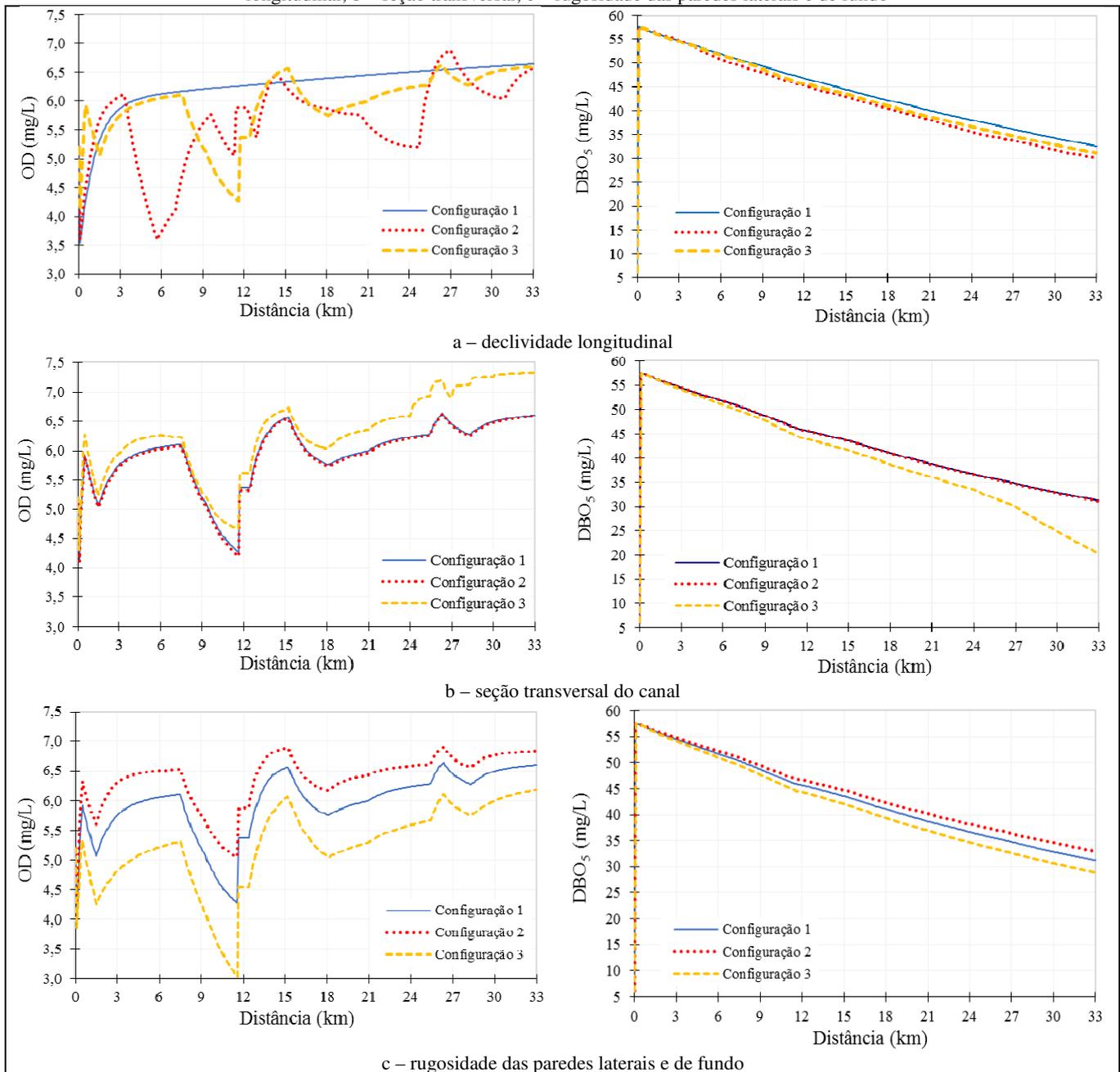
A variação da rugosidade das paredes laterais e de fundo ocasionou a maior sensibilidade no perfil de OD, em comparação com as outras características morfológicas (ver Figura 5-c). O aumento do coeficiente n de rugosidade de Manning (ou seja, aumento na tensão de atrito) acarreta, proporcionalmente, ao aumento da lâmina líquida e diminuição da velocidade média do escoamento. Esta situação, com maior proporção à variação da velocidade média do escoamento, interfere consideravelmente no perfil de OD.

De acordo com a Figura 5-c, as configurações 2 e 3 apresentaram uma tendência de oscilação de OD paralela à apresentada pela configuração ótima (configuração 1). A diferença da concentração de OD para as configurações 2 e 3 variou de 0,6 até 1,75 mg/L ao longo de todo o trecho de rio estudado (ver Figura 5-c).

Apenas como exemplo, para enfatizar a elevada sensibilidade da rugosidade no comportamento de OD e a importância da determinação precisa deste parâmetro, a configuração 2 (coeficiente n de rugosidade igual a 0,035 $m^{-1/3}\cdot s$) faz com que 99,7% do trecho de rio tenha o valor de OD acima de 5,0 mg/L – valor mínimo para a classe 2 – Resolução CONAMA nº 357/2005). Já na configuração 3 (coeficiente n de rugosidade igual a 0,065 $m^{-1/3}\cdot s$), apenas 74,5% do trecho de rio apresenta o valor de OD acima de 5,0 mg/L). Esta discrepância pode comprometer um diagnóstico da capacidade de autodepuração de um curso de água natural.

O perfil de DBO_5 apresentou a mesma tendência de decaimento nas três configurações, com oscilação máxima de 2,5 mg/L das configurações 2 e 3 em relação à configuração ótima 1 (ver Figura 5-c). Isso mostra que, na simulação de DBO_5 , não existe a necessidade de utilização de metodologia precisa na quantificação do coeficiente n de rugosidade, todavia deve-se evitar a utilização de um coeficiente único nas simulações (seja do fundo ou das paredes laterais na calha principal).

Figura 5 – Variação de OD e DBO₅ frente às diversas configurações das características morfológicas, sendo: a – declividade longitudinal; b – seção transversal; c – rugosidade das paredes laterais e de fundo



CONCLUSÕES

Este estudo é muito útil para profissionais na área ambiental que atuam na modelagem matemática de autodepuração em ambientes lênticos e lóticos. A ausência de dados monitorados de qualidade da água disponibilizados pelos órgãos ambientais municipais, estaduais e federais, além dos custos elevados das coletas, transportes e análises laboratoriais dos diversos parâmetros de qualidade da água, obriga a utilização de equações da literatura para a estimativa dos diversos coeficientes de reações bioquímicas.

Diante das metodologias utilizadas neste estudo para obtenção da declividade longitudinal, seção transversal e rugosidade das paredes laterais e de fundo, conclui-se que:

- a consideração de declividade única ao longo do trecho de rio mascara a evolução real do perfil de OD;
- a utilização do perfil de elevação obtido na ferramenta *Google Earth* pode comprometer a qualidade da simulação de OD;
- quanto ao perfil de DBO₅, não existe a necessidade de utilização de uma ferramenta SIG robusta na determinação da declividade longitudinal;
- a adoção de seção trapezoidal com largura da superfície B variável em intervalos de 1000 m, obtida na

ferramenta *Google Earth*, compromete a qualidade da simulação dos perfis de OD e DBO₅;

– o coeficiente n de rugosidade das paredes laterais e de fundo apresenta elevada sensibilidade no comportamento de OD e reduzida sensibilidade no comportamento de DBO₅;

Fica um alerta para as limitações da denominada configuração ótima deste artigo e das equações da literatura na estimativa dos diversos coeficientes de reações bioquímicas. De acordo com diversos trabalhos da literatura, o comportamento dos parâmetros de qualidade da água ao longo do curso de água aproxima-se da realidade quando os coeficientes são calibrados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio financeiro para a realização deste estudo (Processo FAPEMIG nº CRA APQ-01024/14) e agradecem à CAPES pela bolsa de pós-doutorado PNPd fornecida ao último co-autor.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. S. M. **Condições de oxigenação e desoxigenação de um trecho do rio Uberabinha no município de Uberlândia**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. University of Illinois, The Blackburn Press, 2009.
- DE PAULA, L. M. **Avaliação da qualidade da água e autodepuração do rio Jordão, Araguari, MG**. 2011. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- FRAGOSO JUNIOR, C. R.; FERREIRA, T. F.; MARQUES, D. M. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, 304 p.
- IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Cidades. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 05 out. 2015.
- INPE: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata>>. Acesso em: 03 out. 2015.
- JIANG, H.; LIU, F.; TURNER, I.; BURRAGE, K. Analytical solutions for the multi-term time-space Caputo-Riesz fractional advection-diffusion equations on a finite domain. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, v. 389, n. 2, p. 1117-1127, maio, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmaa.2011.12.055>.
- KUMAR, A.; JAISWAL, D. K.; KUMAR, N. Analytical solutions to one-dimensional advection-diffusion equation with variable coefficients in semi-infinite media. **Journal of Hydrology**, v. 380, n. 3-4, p. 330-337, janeiro, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.008>.
- LIU, F.; ZHUANG, P.; ANH, V.; TURNER, I.; BURRAGE, K. Stability and convergence of the difference methods for the space-time fractional advection-diffusion equation. **Applied Mathematics and Computation**, v. 191, n. 1, p. 12-20, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2006.08.162>.
- MELLO, K. B. **Solução da equação de difusão-advecção para uma CLP não-homogênea e não-estacionária pelo método GILTT**. 2005. 64 f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada), Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- OLLIVIER-GOOCH, C.; VAN ALTENA, M. A high-order-accurate unstructured mesh finite-volume scheme for the advection-diffusion equation. **Journal of Computational Physics**, v. 181, n. 2, p. 729-752, 2002. <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.2002.7159>.
- PAREDES-ARQUIOLA, J.; ÁLVAREZ, J. A.; MONERRIS, M. M.; SOLERA, A. Water quantity and quality models applied to the Jucar River Basin, Spain. **Water Resources Management**, v. 24, n. 11, p. 2759-2779, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-010-9578-z>.
- PONSODA, E.; DEFEZ, E.; ROSELLÓ, M. D.; ROMERO, J. V. A stable numerical method for solving variable coefficient advection-diffusion models. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 56, n. 3, p. 754-768, agosto, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2008.02.004>.
- SALLA, M. R. ARQUIOLA, J. P. SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 01, p. 189-204, jan. – mar. 2014a.
- SALLA, M. R.; CHUERUBIM, M. L. Planejamento e gestão ambiental em escala de bacia hidrográfica: Principais dificuldades no manuseio de ferramentas computacionais. **Educação Ambiental em Ação**, v. 13, p. 01-12, 2014b.
- SALLA, M. R.; ARQUIOLA, J. P.; SOLERA, A.; ALVAREZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. Integrated modeling of water quantity and quality in the Araguari River watershed, Brazil. **Latin American Journal of Aquatic Research**, v. 42, p. 224-244, 2014c. <http://dx.doi.org/10.3856/vol42-issue1-fulltext-19>.
- SCHMIDT, M. A. R.; SALLA, M. R.; CHUERUBIM, M. L.; COSTA, E. S. Planejamento e gestão de recursos hídricos: dificuldades conceituais e de compilação de dados. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, p. 3837-3846, 2014. <http://dx.doi.org/10.5902/2236130814701>.
- SKIBA, Y. N.; PARRA-GUEVARA, D. Control of emission rates. **Atmosfera**, v. 26, n. 3, p. 379-400, Julho 2013. [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71084-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71084-1).
- SULIS, A.; SECHI, G. M. Comparison of generic simulation models for water resource systems. **Environmental Modelling Software**, v. 40, n. 1, p. 214-225, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.012>.
- VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2007.
- ZHUANG, P.; LIU, F.; ANH, V.; TURNER, I. Numerical methods for the variable-order fractional advection-diffusion equation with a nonlinear source term. **SIAM Journal on Numerical Analysis**, v. 47, n. 3, p. 1760-1781, 2009. <http://dx.doi.org/10.1137/080730597>.