

RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA EXTENSÃO DE ZONAS DE MISTURA DE EFLUENTES PARA A PORÇÃO SUPERIOR DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTA MARIA DA VITÓRIA

Bárbara Moreto Fim – barbamoretolim@gmail.com
Universidade Federal do Espírito Santo

José Antônio Tosta dos Reis – jatreis@gmail.com
Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo: Os modelos de qualidade da água utilizados em rios, em geral, são unidimensionais, desprezando as variações vertical e transversal do campo de velocidades e assumem que os cursos d'água apresentam regime permanente uniforme (TUCCI, 1998). Desta forma, os tradicionais modelos unidimensionais não permitem a simulação da zona de mistura de efluentes em rios, uma vez que assumem a perfeita mistura entre curso d'água e efluente imediatamente à jusante do ponto de disposição final. O presente estudo tem como principal finalidade estimar, com auxílio de modelos empíricos, a extensão da zona de mistura de efluente na porção superior do rio Santa Maria da Vitória. Para a avaliação das extensões das zonas de mistura foram empregadas as expressões propostas por Fischer et al (1979), Tsai e Holley (1978) e Yotsukura e Sayre (1976). Adicionalmente foi utilizado o modelo clássico de Streeter e Phelps para avaliar, em trechos com extensão correspondente a extensão da zona de mistura, variações nas concentrações de oxigênio dissolvido e de demanda bioquímica de oxigênio. Os resultados obtidos indicam que a zona de mistura representa de 2 a 15 % da extensão de cada trecho estudado, e que, nestas extensões, as variações nas concentrações de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio não seriam significativas.

Palavras-chave: Zona de mistura, Coeficiente, Dispersão transversal.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Num corpo d'água, a zona de mistura é entendida como a região do corpo receptor onde ocorre a diluição inicial de um efluente. Segundo a Resolução nº 357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, na zona de mistura de efluentes, o órgão ambiental competente poderá autorizar, levando em conta o tipo de substância, valores em desacordo com os estabelecidos para a respectiva classe de enquadramento, desde que não comprometam os usos previstos para o corpo de água (CONAMA, 2005). No entanto, a resolução não estabelece diretrizes para a caracterização da zona de mistura, indicando que a extensão e concentração dos constituintes de qualidade nesta região do corpo d'água deverão ser objeto de estudo nos termos determinados pelo órgão ambiental competente.

Segundo Tucci (1998) os modelos de qualidade da água utilizados em rios, em geral, são unidimensionais e representam o escoamento por meio da velocidade média da seção transversal, desprezando as variações vertical e transversal do campo de velocidades. Além disso, eles assumem que os cursos d'água apresentam regime permanente uniforme para simulação da qualidade da água mesmo que o corpo d'água apresente pequenas variações de vazões, como na época de estiagem. No entanto, para simulações do efeito de maré ou enchentes, os modelos que descrevem o regime não-permanente são empregados para simular a qualidade da água, uma vez que os modelos de regime permanente podem não permitir a simulação dos valores críticos reais.

Desta forma, os tradicionais modelos unidimensionais não permitem a simulação da zona de mistura de efluentes em rios. Como regra, esses modelos assumem a perfeita mistura entre curso d'água e efluente imediatamente à jusante do ponto de disposição final. No entanto, para determinados sistemas hídricos, a zona de mistura pode apresentar extensão significativa, representando parcela relevante da extensão total objeto das simulações de qualidade de água.

Neste contexto, o presente trabalho tem como principal finalidade avaliar a extensão da zona de mistura de efluente em rio com auxílio de modelos empíricos. A avaliação da extensão da zona de mistura permitirá avaliar eventuais comprometimentos no processo de seleção de eficiências de tratamento de esgotos a partir do emprego de modelos unidimensionais de qualidade de água.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelos empíricos para simulação da zona de mistura de efluentes

Para a avaliação da extensão das zonas de mistura de efluentes associadas à porção superior do Rio Santa Maria da Vitória, o qual é um dos principais recursos de abastecimento da Região Metropolitana da Grande Vitória, foram considerados os modelos propostos por Fischer et al (1979), Tsai e Holley (1978) e Yotsukura e Sayre (1976), respectivamente apresentados por meio das equações (01), (02) e (03). Os referidos modelos são aplicáveis quando da disposição de efluentes nas margens dos cursos d'água.

$$L_f = \frac{0,40 \cdot \bar{u} \cdot B^2}{\bar{\epsilon}_z} \quad (01)$$

$$L_f = \lambda \frac{\bar{u} \cdot B^2}{\bar{\epsilon}_z} \quad (02)$$

$$L_f = 8,7 \cdot \frac{\bar{u} \cdot B^2}{H} \quad (03)$$

Adicionalmente foram empregados os modelos propostos por Fischer et al (1979) e Yotsukura e Sayre (1976), respectivamente expostos nas Equações (04) e (05), aplicáveis para a avaliação da extensão da zona de mistura quando da disposição final do efluente no centro da seção transversal do curso d'água.

$$L_f = \frac{0,10 \cdot \bar{u} \cdot T^2}{\bar{\epsilon}_z} \quad (04)$$

$$L_f = 4,3 \cdot \frac{\bar{u} \cdot B^2}{H} \quad (05)$$

As Equações de (01) a (05) utilizam as seguintes variáveis:

- L_f : extensão da zona de mistura de efluentes;
- \bar{u} : velocidade média de escoamento na seção transversal;
- $\bar{\varepsilon}_z$: coeficiente de difusão turbulenta da direção transversal;
- λ : coeficiente dependente do perfil de velocidades e da forma de injeção;
- B : largura média do rio;
- H : profundidade média do rio.

Para estimativa do coeficiente ε_z foi empregada a Equação (06), na qual S_0 representa a declividade do leito do rio e α um coeficiente cujos valores variam entre 0,15 (canais retangulares retilíneos) e 0,80 (rios irregulares com muitos meandros).

$$\varepsilon_z = \alpha \cdot H \cdot \sqrt{g \cdot H \cdot S_0} \quad (06)$$

2.2. Cenários de disposição de efluentes variados

Para avaliação de extensões da zona de mistura associadas à porção superior do rio Santa Maria da Vitória foram considerados três diferentes cenários de disposição de efluentes, previamente estudados por Salim (2004). A conformação dos cenários foi estabelecida a partir da combinação de diferentes possíveis pontos de disposição de efluentes e de diferentes vazões para os referidos despejos. Os cenários considerados podem ser sumarizados como segue:

- Cenário 1: lançamento de cinco efluentes de mesma carga e sem nenhum tipo de tratamento ($P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 0,040 \text{ m}^3/\text{s}$), dispostos no Rio Santa Maria da Vitória nos quilômetros 8, 16, 24, 32 e 40.
- Cenário 2: lançamento de cinco efluentes com diferentes cargas de poluição em função de vazões diferenciadas ($P_1 = 0,060 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_2 = 0,050 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_3 = 0,040 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_4 = 0,030 \text{ m}^3/\text{s}$ e $P_5 = 0,020 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Cenário 3: situação hipotética na qual a vazão do rio Alto Posmoser (um dos principais afluentes do rio Santa Maria da Vitória) foi substancialmente aumentada, igualando-se à vazão do rio Santa Maria da Vitória e influenciando de forma significativa a condição de mistura ao longo do curso d'água principal. Considerou-se a disposição de efluentes em quatro pontos à montante do Rio Alto Posmoser (quilômetros 5, 9, 13 e 17), todas no valor de $0,020 \text{ m}^3/\text{s}$; adicionalmente considerou-se um ponto de disposição de esgotos no quilômetro 26, com vazão de $0,050 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nas diferentes avaliações conduzidas assumiu-se para a porção superior do rio Santa Maria da Vitória vazão mínima de $3,85 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3. Simulação da qualidade da água

Com o objetivo de se avaliar a variação das concentrações de oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) num trecho de curso d'água com extensão correspondente à extensão da zona de mistura, simulações de qualidade de água foram conduzidas com auxílio do modelo clássico de Streeter e Phelps, modelo de qualidade de água detalhadamente apresentado e discutido por Von Sperling (2007).

No Modelo de Streeter e Phelps, a taxa de variação das concentrações de OD e de DBO são descritas, respectivamente, pelas Equações (07) e (08).

$$\frac{dC}{dt} = K_1 \cdot L + K_2(C_S - C) \quad (07)$$

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 \cdot L \quad (08)$$

Nas Equações (07) e (08):

- C: concentração de OD da massa líquida (mg/L);
- C_S: concentração de saturação de OD da massa líquida (mg/L);
- L: concentração de DBO remanescente na massa líquida (mg/L);
- K₁: coeficiente de desoxigenação (dia⁻¹);
- K₂: coeficiente de re-aeração (dia⁻¹);
- t: tempo (dia).

A integração das Equações (07) e (08) entre dois instantes quaisquer (t₀ = 0 e t) nos quais são observados diferentes valores de OD e DBO, conduz, respectivamente às equações (09) e (10), nas quais as variáveis L₀ e C₀ representam a demanda bioquímica final e a concentração inicial de oxigênio, estimadas, por sua vez pelas Equações (11) e (12).

$$L(t) = L_0 \cdot e^{-K_1 \cdot t} \quad (09)$$

$$C(t) = C_S - \left\{ \left[\frac{K_1 \cdot L_0}{K_2 - K_1} \cdot (e^{-K_1 \cdot t} - e^{-K_2 \cdot t}) \right] + (C_S - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \right\} \quad (10)$$

$$L_0 = f_C \cdot \frac{Q_R \cdot DBO_R + Q_E \cdot DBO_E}{Q_R + Q_E} \quad (11)$$

$$C_0 = \frac{Q_R \cdot OD_R + Q_E \cdot OD_E}{Q_R + Q_E} \quad (12)$$

Nas Equações (11) e (12):

- Q_R: vazão do curso d'água (m³/s, L/s);
- Q_E: vazão do efluente (m³/s, L/s);
- DBO_R: DBO padrão do curso d'água à montante do lançamento (mg/L);
- DBO_E: DBO padrão do efluente (mg/L);
- OD_R: OD do rio à montante do lançamento (mg/L);
- OD_E: OD do efluente (mg/L);
- f_C: fator de correção para a conversão da DBO padrão em DBO última.

Os valores das constantes cinéticas, temperatura e concentração de saturação de OD foram obtidos no trabalho de Salim (2004). Para as constantes cinéticas K₁ e K₂ foram assumidos os valores de 0,40 dia⁻¹ e 0,23 dia⁻¹, respectivamente. No sistema hídrico assumiu-se a temperatura de 23°C e para a concentração de saturação de OD o valor de 8,6 mg/L. Além disso, segundo Von Sperling (1995), o valor de f_C pode ser obtido pela Equação (13).

$$f_C = \frac{1}{1 - e^{-5K_1}} \quad (13)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada cenário de lançamento foram calculados diferentes valores para ε_z a partir de valores propostos na literatura para α , e pela apropriação de S_0 referente à porção superior do rio Santa Maria da Vitória, com a ferramenta de informação geográfica ArcGIS.

As Tabelas 01, 02 e 03 apresentam as diferentes extensões das zonas de mistura associadas aos cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Os resultados apresentados são decorrentes da aplicação das equações propostas por Fischer et al (1979) e Tsai e Holley (1978). Tabelas semelhantes foram produzidas a partir das equações propostas por Fischer et al (1979) e Yotsukura e Sayre (1976) para lançamento no centro e na margem do rio.

Tabela 01 – Extensão da Zona de Mistura associadas ao Cenário 1

Ponto de Lançamento (m)	Extensão da zona de mistura (m)			
	$\alpha = 0,15$		$\alpha = 0,80$	
	Fischer et al (1979)	Tsai e Holley (1978)	Fischer et al (1979)	Tsai e Holley (1978)
8000	562	1404	105	263
16000	559	1398	105	262
24000	483	1208	91	226
32000	481	1204	90	226
40000	467	1166	88	219

Tabela 02 – Extensão da Zona de Mistura associadas ao Cenário 2

Ponto de Lançamento (m)	Extensão da zona de mistura (m)			
	$\alpha = 0,15$		$\alpha = 0,80$	
	Fischer et al (1979)	Tsai e Holley (1978)	Fischer et al (1979)	Tsai e Holley (1978)
8000	560	1401	105	263
16000	557	1393	105	261
24000	482	1205	90	226
32000	481	1202	90	225
40000	467	1166	88	219

Tabela 03 – Extensão da Zona de Mistura associadas ao Cenário 3

Ponto de Lançamento (m)	Extensão da zona de mistura (m)			
	$\alpha = 0,15$		$\alpha = 0,80$	
	Fischer et al (1979)	Tsai e Holley (1978)	Fischer et al (1979)	Tsai e Holley (1978)
5000	563	1408	106	264
9000	562	1404	105	263
13000	561	1401	105	263
17000	559	1398	105	262
26000	410	1025	77	192

A partir da simples inspeção das informações reunidas nas tabelas de 01 a 03 é possível observar que as variações nas vazões de efluentes impostas entre os cenários 1 e 2 não produziram mudanças significativas nas extensões estimadas para a zona de mistura, independentemente do valor assumido para o coeficiente de difusão turbulenta da direção transversal, do ponto de disposição do efluente na calha do curso d'água (margem ou centro) ou da expressão empregada para o cálculo da zona de mistura. Adicionalmente, as variações do coeficiente de difusão na seção transversal (ϵ_z) afeta significativamente as extensões das zonas de mistura. Alterações do coeficiente α entre os limites sugeridos pela literatura produziram variações nas extensões das zonas de mistura 5 (cinco) vezes superiores.

No terceiro cenário analisou-se o impacto do aumento significativo da vazão do rio Santa Maria da Vitória em função do aumento da vazão de um de seus tributários. Neste cenário, a zona de mistura associada ao último lançamento apresentou extensão de aproximadamente 87% do valor estimado a partir dos dois primeiros cenários. Em função dos baixos valores de vazão associados aos efluentes, não houve intersecção de zonas de mistura dos diferentes lançamentos pontuais considerados para a construção dos diferentes cenários.

Empregando o modelo de Streeter e Phelps, foram estimadas variações nas concentrações de OD e DBO para a porção superior do rio Santa Maria da Vitória. As Figuras 01 e 02 expõem as variações de OD e DBO à jusante dos dois primeiros pontos de disposição de efluentes, para os cenários de lançamento 1 e 2.

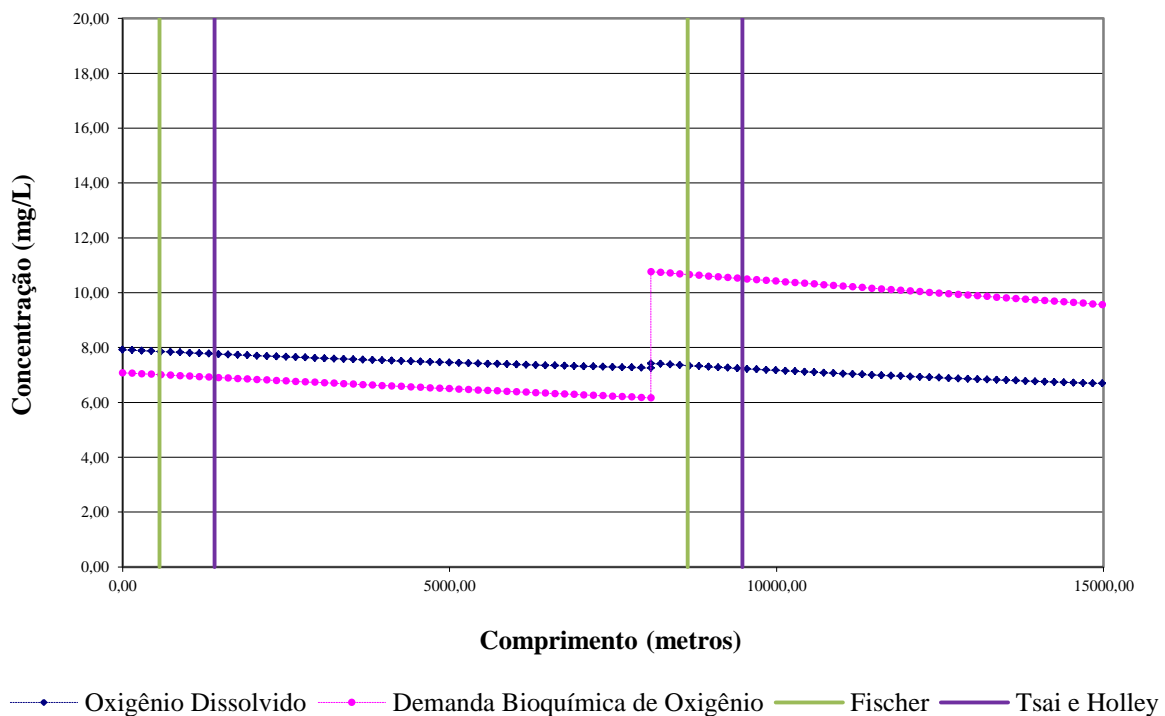


Figura 01 – Variações nas concentrações de OD e DBO e indicação das extensões das zonas de mistura associadas ao primeiro cenário de simulação

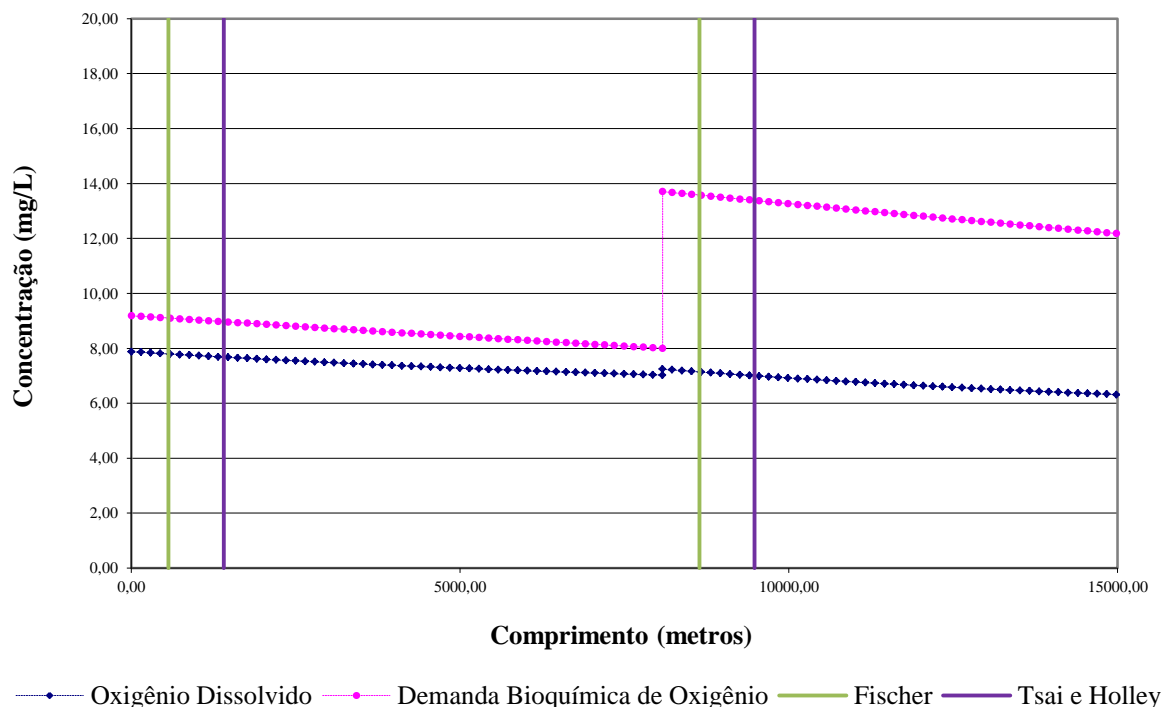


Figura 02 – Variações nas concentrações de OD e DBO e indicação das extensões das zonas de mistura associadas ao primeiro cenário de simulação

Analisando as duas últimas figuras é relevante observar que, para a porção superior do rio Santa Maria da Vitória, naquelas situações em que o curso d'água apresenta condições de recessão, não são significativos os eventuais decaimentos nas concentrações de OD e de DBO em extensões de cursos d'água equivalentes aos comprimentos de zonas de mistura. As variações de DBO nas diferentes extensões das zonas de mistura estimadas, por exemplo, não superaram 0,20 mg/L.

Neste contexto, a imposição de mistura completa nos pontos de disposição de efluentes, característica dos modelos unidimensionais, não compromete a descrição das variações de OD e DBO para o sistema hídrico estudado, observadas as vazões e condições de qualidade dos efluentes assumidas no presente trabalho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apenas as variações de vazões associadas à disposição do último efluente no terceiro cenário de simulações produziram alteração na extensão da zona de mistura de efluentes. As variações das vazões dos efluentes nos dois primeiros cenários de simulação não produziram resultados significativos nas estimativas das extensões das zonas de mistura;

As extensões das zonas de mistura sofreram substanciais alterações quando da adoção dos limites sugeridos pela literatura para o coeficiente α , parâmetro que apresenta relação direta com o coeficiente de difusão turbulenta na seção transversal.

Ainda assim, para as condições de disposição de efluentes consideradas neste estudo, as variações nas concentrações de OD e DBO em trechos de rios com extensões equivalentes às extensões das zonas de mistura de efluentes não foram consideradas significativas.

5. REFERÊNCIAS E CITAÇÕES

CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Publicada no Diário Oficial da União nº 053, de 18/03/2005.** Acesso em: 20/03/2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>

FISCHER, H. B.; LIST, E. J.; KOH, R. C. Y. IMBERGER, J.; BROOKS, N. H. **Mixing in Inland and Coastal Waters.** New York: Academic Press, 1979.

REIS, J. A.T.; MENDONÇA, A. S. F. Análise dos padrões para compostos amoniacais segundo a Resolução CONAMA 20/86. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 4, p. 146-154, 1998.

SALIM, F.P.C. **Desenvolvimento de sistema de suporte a decisão para o gerenciamento da qualidade das águas em rios considerando múltiplas fontes de poluição pontual.** Vitória, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. **A study of the pollution and natural purification of the Ohio River.** Public Health Bulletin 146, U.S. Washington: Public Health Service, 1925.

TSAI, Y. H.; HOLLEY, E. R. Temporal Moments for Longitudinal Dispersion. **Journal of Hydraulics Division**, nº 103, p. 1617-1634, 1978.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, G. Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa de disponibilidade hídrica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 97-110, 1998.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios.** 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 588 p.

YATSUKURA, N.; SAYRE, W. W. Transverse Mixing in Natural Channels. **Water Resouces Research**, nº 12, p. 695-704, 1976.