

MODELO NUMÉRICO PARA A SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NO TRECHO URBANO DO RIO JAÚ, MUNICÍPIO DE JAÚ (SP)

Julio César de Souza Inácio Gonçalves¹, Diego de Souza Sardinha² e Fernando Fricher Boesso³

Resumo: Desde 1925, com o surgimento do modelo de Streeter-Phelps, modelos matemáticos são utilizados para estimar a concentração de parâmetros de qualidade da água em bacias hidrográficas urbanas, pois estas são locais que apresentam uma ampla gama de problemas ambientais. Assim, este trabalho avaliou e simulou durante o período chuvoso (março) e período seco (agosto), a concentração de condutividade, oxigênio dissolvido, cloreto, amônia, nitrato e demanda bioquímica de oxigênio, nas águas do Rio Jaú, no trecho urbano do município de Jaú (SP). Os resultados indicaram que apesar da sazonalidade de alguns parâmetros estudados, as águas do rio Jaú estão dentro dos padrões estabelecidos pela legislação ambiental vigente. O bom ajuste entre o modelo e os dados coletados em campo indica que o mesmo pode ser utilizado em estudos visando à obtenção de cenários, como a capacidade do sistema de receber efluentes, além de quantificar os impactos causados por determinadas ações pontuais. O rio Jaú é enquadrado como de Classe 3, no entanto recomenda-se um estudo futuro que possa subsidiar propostas de reequilíbrio do corpo hídrico.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica. Avaliação da qualidade da água. Modelagem matemática. Bacia do rio Jaú.

1 Introdução

Dentre os recursos ambientais, a água apresenta um significativo destaque, pois sua manutenção em boa condição sanitária é irrevogavelmente necessária a toda forma de vida do planeta. Recentemente o ser humano tem notado que este recurso é limitado, não só quantitativamente, mas também pela capacidade de assimilar materiais poluentes (GONÇALVES et al., 2009).

É cada vez mais urgente a necessidade de se identificar e diagnosticar os fatores que afetam a qualidade da água, bem como prever os impactos futuros decorrentes de determinados eventos ou condições específicas, para melhor auxiliar a administração dos recursos hídricos com propostas ou alternativas concretas e realmente eficazes (GASTALDINI et al., 2002). Por isso, a utilização de modelos matemáticos para a simulação da qualidade da água torna-se um importante instrumento para auxiliar na tomada de decisão tanto na

prevenção como na correção da degradação dos recursos hídricos.

O marco inicial do uso da modelagem nos estudos da poluição dos corpos hídricos foi em 1925 com o clássico modelo de Streeter-Phelps, o qual foi desenvolvido a partir de intensos estudos das fontes de poluição e seus impactos no rio Ohio, EUA (ORLOB, 1983; THOMANN; MÜELLER, 1987; CHAPRA, 1997; LIMA, 1997). Este modelo descreveu o aumento, seguido de decréscimo, do déficit de oxigênio a jusante de uma fonte de material orgânico. O modelo de Streeter-Phelps foi posteriormente estendido para processos com nitrogênio, detalhados pelo modelo da EPA (*United States Environmental Protection Agency*) com nitrificação, o QUAL I. O ciclo do fósforo e algas foi adicionado na formulação do modelo QUAL2E; e o processo de desnitrificação é incluído com o desenvolvimento do modelo QUAL2K, versão modificada do modelo QUAL2E.

Neste sentido, os modelos matemáticos de qualidade da água surgiram a partir da intenção preditiva do controle

1 E-mail: julio@icte.uftm.edu.br

2 E-mail: diegosardinha@icte.uftm.edu.br
Av. Doutor Randolpho Borges Júnior, nº1250. Bairro Univerdecidade – Uberaba (MG) – CEP 38064-200

3 E-mail: fernandoesso@hotmail.com

ambiental, utilizados como ferramentas para avaliar os efeitos das ações antrópicas e propor alternativas para preservar os recursos hídricos (LIMA, 1997). A utilização de modelo de qualidade da água em rios e ribeirões envolve o uso de parâmetros hidráulicos e geométricos que necessitam ser bem avaliados para que o modelo forneça resultados confiáveis (BARBOSA Jr., 1997). Assim, a aplicação dos modelos matemáticos para o gerenciamento dos recursos hídricos é totalmente dependente dos estudos quantitativos e qualitativos da água, assim como da caracterização espacial e temporal dos resíduos lançados nos corpos hídricos. Os dados obtidos em campo são essenciais para calibração do modelo, interferindo significativamente na qualidade do resultado (GONÇALVES, 2009).

Segundo Tucci (1998), os modelos matemáticos são técnicas que permitem representar alternativas propostas e simular condições reais que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento técnico-científico. O modelo matemático de qualidade da água é visto como um auxiliar valioso para simular alternativas, onde seu conhecimento se torna essencial para que as alternativas e os resultados sejam representativos e possam ser corretamente avaliados. Torna-se possível, desta forma, estimar a capacidade do sistema de receber efluentes, além de quantificar os impactos causados por determinadas ações. Atualmente há vários estudos que avaliam a qualidade da água e utilizam diversos modelos matemáticos para estimar o déficit da concentração de oxigênio em rios, dentre eles destacam-se os estudos da USEPA (2004; 2005); de Conceição et al.

(2007); Sardinha et al. (2008) e de Gonçalves et al. (2009).

Atualmente, há grande preocupação em se ter uma abordagem integrada para estudos em bacias hidrográficas urbanas. Estes locais apresentam uma ampla gama de problemas ambientais, provocados principalmente pela ocupação desordenada do solo e despejos de efluentes domésticos e industriais, que ocasionam a degradação da qualidade da água, enchentes, assoreamento etc. Assim, este trabalho teve como principal objetivo a avaliação da qualidade da água e a modelagem matemática de oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, amônio, nitrato, cloreto e condutividade nas águas do rio Jaú, no trecho urbano do município de Jaú (SP), visando auxiliar o conhecimento deste ecossistema aquático e fornecer importantes subsídios para seu desenvolvimento sustentável.

2 Aspectos gerais da bacia do rio Jaú (SP)

A bacia do rio Jaú está localizada na porção central do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22°15' e 22°30' de latitude sul e os meridianos 48°16' e 48°45' de longitude oeste (Figura 1). Com uma área total de 467,2 km², a bacia do rio Jaú abrange 5 municípios com uma população total de 182.136 habitantes, sendo que, os municípios de Dois Córregos (45,61%) e Jaú (36,36%) apresentam as maiores áreas percentuais desta bacia. Porém nem todos os municípios possuem suas áreas urbanas dentro da bacia (Tabela 1).

Tabela 1 - Bacia do rio Jaú com os respectivos municípios componentes, população e distribuições territoriais (FEHIDRO-IPT, 2006, IBGE, 2009).

Município	Área total (km ²)	Porcentagem do município na bacia (%)	População
Dois Córregos	213,09	45,61	24.384
Itapuí	2,03	0,44	11.605
Jaú	169,85	36,36	125.469
Mineiros do Tietê	74,52	15,95	11.760
Torrinha	7,67	1,64	8.918

De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região da bacia do rio Jaú é do tipo Cwa, mesotérmico, também chamado de Tropical de Altitude, que é caracterizado por possuir um inverno seco e

verão chuvoso, e temperatura média superior a 22 °C. A precipitação pluviométrica anual apresenta média de 1.428 mm. O período chuvoso é de outubro a março e o período seco é de abril a setembro.

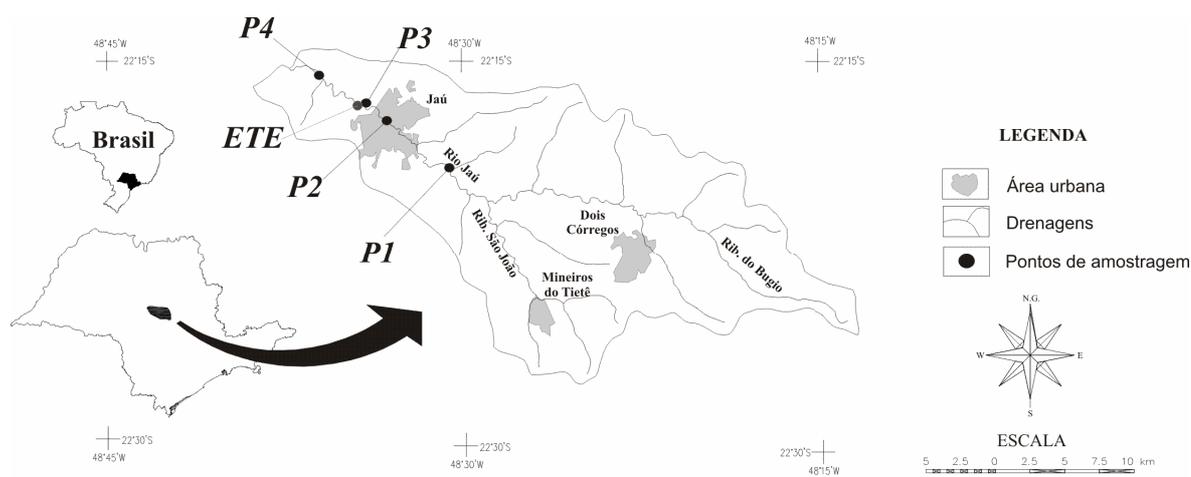


Figura 1 - Mapa da bacia do rio Jaú com a localização dos pontos de coleta de água (P1 – montante do município de Jaú; P2 – área urbana de Jaú; P3 – jusante da área urbana; e P4 – jusante da área urbana, próximo ao exutório do rio Jaú, e estação de tratamento de esgotos (ETE).

O rio Jaú é enquadrado como Classe 3 pelo decreto nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976), desde a confluência com o ribeirão Pouso Alegre até o rio Tietê, e desde a confluência com o Córrego do Pires até a confluência com o ribeirão Pouso Alegre. As cargas poluidoras de origem doméstica referem-se aos pontos de lançamento de esgotos, coletados em áreas urbanas, e são consideradas como fontes pontuais de

poluição direta dos cursos d'água onde são lançadas, podendo também afetar as águas subterrâneas e solos de forma indireta. Segundo FEHIDRO-IPT (2006), nos municípios da bacia do rio Jaú foram identificados 24 pontos de lançamentos de efluentes domésticos de uso público, sendo oito desses pontos localizados fora do limite da bacia do rio Jaú (Tabela 2).

Tabela 2 - Pontos de lançamentos de cargas orgânicas domésticas dos municípios da bacia do rio Jaú. Modificado de FEHIDRO-IPT (2006).

Município	Corpo receptor
Dois Córregos Itapuí	Córregos do Lajeado, Fundo e Areia Branca *Rio Tietê
Jaú	Rio Jaú (4 pontos), *Córrego da Figueira (2 pontos), Córrego dos Pires (2 pontos), Córregos da Independência, *Ave Maria e Água Branca, e Ribeirão Pouso Alegre
Mineiros do Tietê Torrinha	Córrego do Pascoal (4 pontos) *Ribeirão dos Pinheiros (2 pontos), *Córrego do Talo e *Rio Boa Esperança

(*) Lançamentos localizados fora dos limites da bacia do rio Jaú.

A bacia do rio Jaú está inserida na Província Geomorfológica das Cuestas Basálticas, segundo a subdivisão geomorfológica do Estado de São Paulo (IPT, 1981). Esta província geomorfológica apresenta-se sob a forma de diversos planaltos e transições interplanálticas, configurando um vasto interflúvio, que avança sobre a Depressão Periférica. Os tipos de solos estão diretamente relacionados ao relevo regional e ao substrato rochoso, sendo que os três principais tipos de solos encontrados na bacia são os Latossolos, Litossolos e Terra Rocha. Quanto à geologia, ocorrem na área da bacia do rio Jaú, apenas as unidades da

bacia do Paraná pertencentes ao Grupo São Bento (Formação Serra Geral) e a unidade de rocha sedimentar que ocorre como cobertura das lavas basálticas (Formação Itaqueri).

3 Materiais e métodos

Para a avaliação da qualidade da água, foram realizadas oito coletas de água em quatro pontos de amostragem, P1 – montante do município de Jaú; P2 – área urbana de Jaú; P3 – jusante da área urbana; e P4 – jusante da área urbana, próximo ao exutório do rio Jaú (Figura 1). Quatro coletas

de água foram realizadas no mês de março (16/03/2010; 20/03/2010; 24/03/2010; e 30/03/2010) e quatro no mês de agosto (16/08/2010; 21/08/2010; 25/08/2010; e 29/08/2010), visando caracterizar a sazonalidade hidrológica, ou seja, período seco e período chuvoso.

Ao todo, dez variáveis de qualidade da água foram avaliadas, sendo elas temperatura (T), turbidez (Turb.), potencial hidrogeniônico (pH), condutividade (Cond.), oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), amônia (NH_3), nitrato (NO_3^-), cloreto (Cl^-) e sólidos totais em suspensão (STS). As medidas de temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$), concentração de oxigênio dissolvido (mg/L), pH e condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$) foram feitas diretamente no próprio local, com o uso do analisador multiparâmetros *Vernier*.

Amostras de águas fluviais foram armazenadas em vasilhames de polietileno, acondicionadas em isopor com gelo e encaminhadas ao laboratório de química das Faculdades COC de Ribeirão Preto (SP), onde foram analisados os parâmetros físico-químicos e químicos, como turbidez (NTU), amônia (mg/L), nitrato (mg/L), cloreto (mg/L), demanda bioquímica de oxigênio (mg/L) e sólidos totais em suspensão (mg/L). As variáveis turbidez (0 a 200 ± 2 NTU), amônia (0 a $10 \pm 0,2$ mg/L), nitrato (0 a $20 \pm 0,4$ mg/L) e cloreto (de $0,01$ a $100 \pm 0,02$ mg/L) foram mensuradas com analisador multiparâmetros *Vernier*. Demanda bioquímica de oxigênio (mg/L) e sólidos totais em suspensão (mg/L) foram quantificados pela metodologia descrita na 19ª edição do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995).

A vazão no ponto de amostragem P1 – montante do município de Jaú- foi medida de acordo com a metodologia descrita por (HERMES; SILVA, 2004), utilizando-se uma trena, um objeto flutuador e um cronômetro, sendo as variáveis colocadas na equação (1):

$$Q = \frac{A \cdot D \cdot C}{t} \quad (1)$$

sendo Q a vazão (m^3/s); A a área da seção transversal do rio (m^2); D a distância usada para medir a velocidade do escoamento (m); C o coeficiente de correção (0,8 para rios com fundo rochoso e 0,9 para rios com fundo lodoso) e t é o tempo (s) gasto pelo objeto flutuador para percorrer a distância D.

Para a simulação da qualidade da água neste trabalho, foram utilizadas soluções numéricas implementadas em um *software* de planilha eletrônica, ou folha de cálculo, com passo de integração de 50 metros, suficiente para evitar imprecisões numéricas, conforme apresentado por Gonçalves et al. (2010). A qualidade da água foi simulada em regime permanente, desconsiderando-se a dispersão longitudinal. Assim, o modelo foi construído considerando um reator de fluxo em pistão, no qual a advecção é utilizada como mecanismo de transporte. Aplicando o princípio de conservação de massa para a variável oxigênio dissolvido, representada pela equação (2), e dividindo os dois lados da equação por Δt , V, assim como considerando $\Delta x A$ igual a V, obtém-se a equação (3). Quando $\Delta t \rightarrow 0$ e considerando o regime permanente chega-se às equações (4) e (5), respectivamente.

$$V \Delta \Delta_{\text{OD}} = [U A C_{\text{OD}} - \left(U A C_{\text{OD}} + U A \frac{\partial C_{\text{OD}}}{\partial x} \Delta x \right) + K_2 (C_S - C_{\text{OD}}) V - K_1 V C_{\text{DBO}} - R_{\text{NH}_3} K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3} V] \Delta t \quad (2)$$

$$\frac{\Delta C_{\text{OD}}}{\Delta t} = -U \frac{\partial C_{\text{OD}}}{\partial x} + K_2 (C_S - C_{\text{OD}}) - R_{\text{NH}_3} K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3} - K_1 C_{\text{DBO}} \quad (3)$$

$$\frac{dC_{\text{OD}}}{dt} = -\frac{U \partial C_{\text{OD}}}{\partial x} + K_2 (C_S - C_{\text{OD}}) - R_{\text{NH}_3} K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3} - K_1 C_{\text{DBO}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{\text{OD}}}{\partial x} = \frac{K_2 (C_S - C_{\text{OD}}) - R_{\text{NH}_3} K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3} - K_1 C_{\text{DBO}}}{U} \quad (5)$$

onde Δx é o comprimento do volume de controle (m); Δt é o intervalo de tempo (s); U é a velocidade média do escoamento (m/s); V é o volume, e C_{OD} é a concentração de

oxigênio dissolvido (mg/L). A Tabela 3 define as demais variáveis presentes nas equações 2 a 5.

Vale destacar que, os balanços de massa para as outras variáveis são semelhantes ao apresentado nas equações 2 a 5, ou seja, eles são constituídos por

equações que representam o transporte por advecção e, também, por reações cinéticas que representam consumo ou produção, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Reações bioquímicas e físicas de conversão: K_2 , K_1 e K_{NH_3} coeficientes cinéticos que quantificam a velocidade da reação [T^{-1}]; R_{NH_3} coeficiente estequiométrico de conversão de nitrogênio em oxigênio (4,57 gO₂/gN); V volume do volume de controle [L^3]; C_s concentração de saturação de oxigênio dissolvido no corpo d'água [$M.L^{-3}$]; C_{OD} concentração de oxigênio dissolvido [$M.L^{-3}$]; C_{DBO} concentração de DBO [$M.L^{-3}$]; C_{NH_3} concentração de amônia [$M.L^{-3}$].

Variável	Produção	Consumo	Taxas [Massa/Tempo]
OD	Reaeração superficial	Decomposição da DBO; e Nitrificação	$K_2V(C_s - C_{OD})$; K_1VC_{DBO} ; R_{NH_3} K_{NH_3} VC_{NH_3}
DBO	-	Decomposição da DBO	K_1VC_{DBO}
NH ₃	-	Nitrificação	K_{NH_3} VC_{NH_3}
NO ₃ ⁻	Nitrificação	-	K_{NH_3} VC_{NH_3}
Cl ⁻ *	-	-	-
Cond.*	-	-	-

*Constituintes conservativos, não há produção e nem consumo.

Os coeficientes cinéticos são influenciados pela temperatura da água, uma vez que a mesma afeta a velocidade das reações químicas e bioquímicas. A correção do valor do coeficiente cinético em função da temperatura é descrito pela equação (6).

$$K = K(20) \cdot \theta^{(T-20)} \quad (6)$$

sendo T a Temperatura da água (°C); e θ o coeficiente que representa o efeito da temperatura sobre as taxas de produção e decaimento das variáveis de qualidade da água modelados (adimensional).

As equações diferenciais ordinárias construídas a partir dos balanços de massa são integradas numericamente. O método apresentado neste trabalho foi o de Euler, o qual por integração fornece a equação geral 7.

$$C_{n+1} = C_n + (\text{taxa de reação} \times \Delta x) \quad (7)$$

sendo C_{n+1} a concentração em uma posição qualquer (mg/L); C_n a concentração na posição anterior (mg/L); e taxa de reação é a declividade da reta usada para encontrar o próximo ponto.

A fim de aplicar este modelo, foi necessário dividir o rio em seções com características hidráulicas aproximadamente uniformes. Assim, neste trabalho adotaram-se quatro trechos em função das características de escoamento, da localização das fontes poluidoras e dos pontos de monitoramento, sendo eles assim divididos: trecho 1 – do ponto P1 ao ponto P2; trecho 2 – do ponto P2 ao ponto P3; trecho 3 – do ponto P3 a ETE; e trecho 4 – da ETE ao ponto P4 (Tabela 4).

Tabela 4 – Características geométricas dos trechos simulados no rio Jaú.

Trecho	Comprimento (m)	Período seco		Período chuvoso	
		Largura (m)	Profundidade (m)	Largura (m)	Profundidade (m)
1	0 - 4000	7,0	0,85	7,5	1,3
2	4000 - 7400	9,0	0,90	9,5	1,4
3	7400 - 7800	9,0	0,95	9,5	1,4
4	7800 - 13900	9,5	1,15	12	1,7

O modelo exige ainda a vazão média no ponto P1 e P4. No ponto P1 o valor adotado foi de 4,87 m³/s no período seco e 8,67 m³/s no período chuvoso. No quilômetro 7,8, a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) despeja no rio Jaú 0,29 m³/s de

efluentes (informação pessoal – SANEJ: Saneamento de Jaú Ltda), elevando a vazão média no ponto P4 para 5,16 m³/s no período seco e 8,96 m³/s no período chuvoso.

4 - Resultados e discussão

4.1 Avaliação da qualidade da água

Os resultados das análises físico-químicas efetuadas durante o período de

coleta são apresentados na Tabela 5 e confirmaram que a temperatura da água medida em todos os pontos de amostragem mostrou-se mais elevada no verão chuvoso (março) do que no inverno seco (agosto), conforme esperado.

Tabela 5 – Resultado dos parâmetros analisados no rio Jaú.

Data de coleta	T (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	Turb. (NTU)	STP OD Cl ⁻ NO ₃ ⁻ NH ₃ DBO					
					(mg/L)					
Ponto 1 - rio Jaú - montante do município de Jaú										
16/03/2010	25,00	7,60	85,40	53,70	6,00	5,70	51,00	2,30	0,80	2,00
20/03/2010	25,60	7,59	81,90	60,50	12,00	6,70	28,00	1,90	0,80	1,90
24/03/2010	25,40	7,44	81,80	48,90	20,00	6,30	25,00	2,60	0,78	2,00
30/03/2010	25,00	7,52	82,80	54,50	23,00	5,90	30,00	2,10	0,81	2,10
16/08/2010	23,80	7,02	43,10	40,50	9,00	4,90	44,70	1,80	0,30	1,50
21/08/2010	23,50	7,04	46,20	39,60	13,00	4,70	55,50	1,30	0,31	1,50
25/08/2010	23,10	6,90	48,20	38,90	19,00	4,40	48,90	2,10	0,29	1,40
29/08/2010	23,60	7,00	53,20	40,10	21,00	5,30	51,50	2,10	0,30	1,60
Ponto 2 - rio Jaú - área urbana do município de Jaú										
16/03/2010	25,00	7,40	78,90	49,30	20,00	5,20	38,00	2,50	0,81	2,10
20/03/2010	25,30	7,66	85,60	57,00	16,00	6,50	20,00	1,70	0,80	2,00
24/03/2010	25,00	7,40	80,20	53,70	20,00	6,10	29,00	2,10	0,79	2,00
30/03/2010	25,20	7,46	81,90	50,00	27,00	5,90	34,00	2,00	0,79	1,90
16/08/2010	23,60	6,88	42,30	40,00	19,00	5,10	40,30	2,00	0,31	0,70
21/08/2010	23,40	7,00	45,30	38,40	14,00	4,70	51,00	1,70	0,29	0,50
25/08/2010	23,30	6,94	47,20	43,70	20,00	4,40	55,60	1,30	0,30	1,40
29/08/2010	23,80	6,92	50,50	40,60	21,00	4,10	50,00	2,00	0,30	1,40
Ponto 3 - rio Jaú - jusante da área urbana de Jaú										
16/03/2010	25,20	7,43	86,50	52,90	12,00	5,40	45,00	2,80	0,72	2,00
20/03/2010	25,40	7,40	78,30	58,30	16,00	5,90	46,00	2,30	0,68	2,10
24/03/2010	25,20	7,36	80,90	56,00	22,00	5,90	40,10	2,30	0,39	1,90
30/03/2010	25,00	7,34	80,00	55,70	20,00	5,70	47,20	2,20	0,41	2,00
16/08/2010	23,60	6,90	46,90	42,90	10,00	5,40	46,90	2,50	0,22	1,60
21/08/2010	23,80	6,91	47,80	38,80	11,00	4,90	49,30	1,90	0,19	1,50
25/08/2010	23,40	6,58	49,80	40,00	21,00	4,30	56,00	1,40	0,21	1,60
29/08/2010	23,50	7,00	49,10	39,60	20,00	5,10	53,60	2,30	0,18	1,10
Ponto 4 - rio Jaú - próximo ao exutório										
16/03/2010	25,30	7,47	86,70	57,10	10,00	5,00	35,30	2,90	0,71	1,90
20/03/2010	25,50	7,40	81,50	59,00	10,00	5,70	47,00	2,10	0,69	2,10
24/03/2010	25,20	7,63	85,50	60,00	21,00	5,70	48,60	2,30	0,40	2,00
30/03/2010	25,00	7,48	86,90	60,50	23,00	5,40	38,00	2,30	0,40	2,20
16/08/2010	24,30	6,95	47,80	47,60	14,00	5,00	49,50	2,10	0,22	2,10
21/08/2010	24,10	6,97	45,10	41,20	17,00	5,30	48,00	2,00	0,18	1,90
25/08/2010	24,00	6,87	48,50	42,50	21,00	5,30	51,50	1,70	0,18	1,90
29/08/2010	24,30	6,76	49,30	40,80	19,00	5,10	55,50	2,30	0,16	2,00

Dentre os pontos analisados, o valor máximo e mínimo da temperatura da água foi registrado no ponto P1, 25,60°C e 23,10 °C respectivamente, podendo assim, observar-se uma variação média de aproximadamente

2,00°C na temperatura da água entre o verão e o inverno (Figura 2). O pH é governado pelo equilíbrio do dióxido de carbonato, bicarbonato e carbonatos. Na bacia, os valores obtidos na maioria dos pontos de

amostragem indicam que as águas são geralmente neutras, encontrando-se ele dentro da faixa de proteção da vida aquática, segundo a Legislação Federal, Resolução nº 357 do CONAMA (BRASIL, 2005) para rios de Classe 3. O valor máximo foi registrado no ponto P2, área urbana do município de Jaú (7,66) no dia 20/03/2010 e o menor valor no ponto P3, jusante da área urbana (6,58) no dia 25/08/2010. Os valores obtidos indicam que as águas do rio Jaú são mais básicas no período chuvoso e ácidas no período seco, média de 7,47 e 6,92 respectivamente (Figura 2).

Segundo Porto (1991), através da condutividade é possível quantificar os macronutrientes; obter informações sobre a produção primária (reduz a condutividade) e a decomposição (aumenta a condutividade); identificar as fontes poluidoras e identificar as diferenças hidrogeoquímicas. Os menores valores de condutividade elétrica foram obtidos para o ponto P2 (42,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Os maiores valores de condutividade foram quantificados no ponto P4 após a cidade de Jaú, próximo ao exutório do rio Jaú (86,90 $\mu\text{S}/\text{cm}$). O intemperismo das rochas sedimentares da Formação Itaquerí e ígneas da Formação Serra Geral podem elevar a condutividade, assim como as atividades agrícolas realizadas na bacia.

A turbidez na água é causada pela matéria orgânica e inorgânica em suspensão (ESTEVES, 1998). Os valores de turbidez medidos ao longo do rio Jaú registraram pequena variação durante os meses de coleta, sendo os maiores valores obtidos nos meses de maior vazão, indicando que os valores mais elevados devem-se à maior quantidade de material em suspensão transportado para o rio pelas águas superficiais de escoamento (Figura 2). A variação máxima da turbidez foi de 14,5 NTU do período chuvoso para o período seco.

A concentração de sólidos nos ecossistemas aquáticos lóticos está fortemente relacionada a todas as impurezas encontradas no curso da água, exceto os gases (ESPÍNDOLA et al., 2000). Há um aumento dos valores de sólidos totais em suspensão no período chuvoso e diminuição na época de seca (Figura 2), assim como observado para os valores de pH, condutividade e turbidez, isso se deve provavelmente a um maior arraste de sedimentos transportados pela erosão laminar (Latosolos, Litossolos e Terra Rocha), que é muito acentuada em época de chuva.

Dentre os gases dissolvidos na água, o oxigênio é um dos mais importantes na dinâmica e caracterização de ecossistemas aquáticos. As principais fontes de oxigênio para a água são a atmosfera e a fotossíntese. Por outro lado, as perdas se devem ao consumo pela decomposição da matéria orgânica (oxidação), difusão para a atmosfera, respiração de organismos aquáticos e oxidação de íons metálicos, como, por exemplo, o ferro e o manganês (ESTEVES, 1998). Como pode ser observado na Tabela 5 e Figura 2, há uma variação dos valores de oxigênio dissolvido em todos os pontos de amostragem em relação à época de chuva e a época seca. Em geral, os maiores valores de oxigênio dissolvido foram obtidos nos pontos P1 e P2, e são mais elevados no período chuvoso. Fato que pode ser atribuído ao aumento da vazão na época de chuva (verão), ocasionando maior turbulência na água, além da maior capacidade de diluição dos efluentes (maiores concentrações de OD).

A presença de cloreto nas águas naturais se deve à alteração das rochas, dentre outros fatores (CETESB, 2005). A bacia do rio Jaú não possui rochas que tenham cloreto como constituinte principal de seus minerais, neste sentido a entrada natural deste elemento pode ser descartada. As concentrações de cloreto aumentam ao longo do curso do rio Jaú, principalmente após a passagem pela área urbana do município, com maiores concentrações no ponto P3 (Figura 2). No período seco as concentrações de cloreto são maiores que no período chuvoso (variação máxima de 18,98 mg/L no ponto P2), provavelmente devido ao menor efeito de diluição no período seco.

O nitrato íon, altamente solúvel, é encontrado nas águas como resultado da oxidação de compostos nitrogenados como a amônia. Apesar de serem nutrientes essenciais para as plantas, podem, em excesso, juntamente com o fósforo, acelerar a eutrofização do corpo hídrico. Concentrações acima de 0,2 mg/L de NO_3^- desencadeiam o processo de proliferação de plantas, já concentrações acima de 5 mg/L normalmente indicam poluição por fertilizantes usados na agricultura, ou dejetos humanos e animais (HERMES; SILVA, 2004). As maiores concentrações dos elementos nitrato (pontos P3 e P4, média de 2,40 mg/L) e amônia (pontos P1 e P3 média de 0,80 mg/L), foram encontradas durante o período chuvoso, possivelmente devido a

erosão laminar (lixiviação de solos agrícolas). O mesmo comportamento foi encontrado para DBO, ou seja, maiores

concentrações no ponto P4 (média de 2,05 mg/L) durante o período chuvoso (Figura 2).

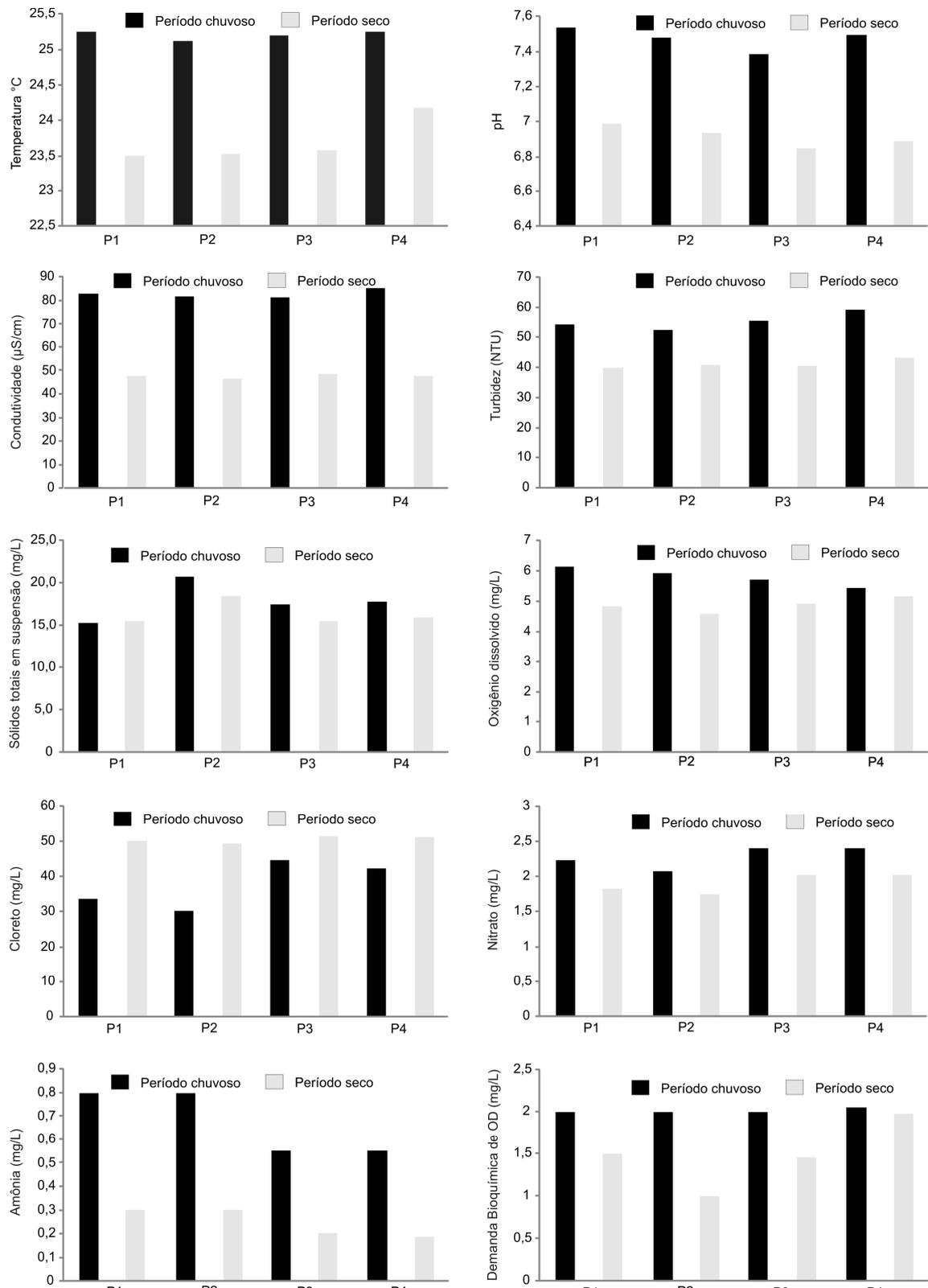


Figura 2 - Média dos parâmetros físicos e físico-químico analisados durante o período seco e chuvoso na bacia do rio Jaú.

4.2 Simulação da qualidade da água

As equações diferenciais construídas a partir dos balanços de massa para condutividade (equação 8); oxigênio

dissolvido (equação 9); cloreto (equação 10); nitrato (equação 11); amônia (equação 12) e demanda bioquímica de oxigênio (equação 13) são apresentadas a seguir.

$$\frac{dC_{\text{Cond}}}{dx} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_{\text{OD}}}{\partial x} = \frac{K_2(C_S - C_{\text{OD}}) - R_{\text{NH}_3} K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3} - K_1 C_{\text{DBO}}}{U} \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_{\text{Cl}}}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_{\text{NO}_3^-}}{\partial x} = \frac{K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3}}{U} \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_{\text{NH}_3}}{\partial x} = -\frac{K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_3}}{U} \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_{\text{DBO}}}{\partial x} = -\frac{K_1 C_{\text{DBO}}}{U} \quad (13)$$

As equações diferenciais foram integradas com o uso do método de Euler, obtendo-se as seguintes soluções numéricas (condutividade - equação 14; oxigênio

dissolvido - equação 15; cloreto - equação 16; nitrato - equação 17; amônia - equação 18; e demanda bioquímica de oxigênio - equação 19).

$$C_{\text{Cond}_{n+1}} = C_{\text{Cond}_n} \quad (14)$$

$$C_{\text{OD}_{n+1}} = C_{\text{OD}_n} + \left(\frac{K_2(C_S - C_{\text{OD}_n}) - R_{\text{NH}_3} K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_{3n}} - K_1 C_{\text{DBO}_n}}{U} \times \Delta x \right) \quad (15)$$

$$C_{\text{Cl}_{n+1}} = C_{\text{Cl}_n} \quad (16)$$

$$C_{\text{NO}_3^-_{n+1}} = C_{\text{NO}_3^-_n} + \left(\frac{K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_{3n}}}{U} \times \Delta x \right) \quad (17)$$

$$C_{\text{NH}_{3n+1}} = C_{\text{NH}_{3n}} - \left(\frac{K_{\text{NH}_3} C_{\text{NH}_{3n}}}{U} \times \Delta x \right) \quad (18)$$

$$C_{\text{DBO}_{n+1}} = C_{\text{DBO}_n} - \left(\frac{K_1 C_{\text{DBO}_n}}{U} \times \Delta x \right) \quad (19)$$

A calibração do modelo foi realizada pela variação dos coeficientes cinéticos e também pela variação das concentrações das variáveis da fonte pontual na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), as quais não

foram medidas. Na Tabela 6 são apresentados os valores dos coeficientes e das concentrações utilizadas para a calibração do modelo.

Tabela 6 - Concentrações e coeficientes utilizados para a calibração do modelo numérico.

Variáveis	Concentrações do lançamento da ETE	Coeficientes cinéticos (base e, 20°C) [dia ⁻¹]	
OD (mg/L)	3	K ₁	0,30
DBO (mg/L)	8		
NH ₃ mg/L)	0	K ₂	1,15 (período chuvoso) 1,50 (período seco)
NO ₃ ⁻ (mg/L)	7		
Cl ⁻ (mg/L)	50	K _{NH3}	1,4
Cond. (µS/cm)	80		

Os resultados produzidos pelo modelo proposto mostraram-se bastante acurados neste estudo (Figura 3), pois nota-se uma pequena diferença quando comparados os dados obtidos pelo modelo com os dados reais para a condutividade e a concentração de oxigênio dissolvido, cloreto, nitrato, amônia, e demanda bioquímica de oxigênio ao longo do rio Jaú. Na Figura 3 pode ser observado que no quilômetro 7,8, devido à introdução da fonte pontual (ETE), há um aumento da concentração de cloreto, nitrato e DBO e um decaimento na concentração de oxigênio dissolvido e amônia para ambos os períodos estudados ao longo do percurso do rio Jaú, porém, estes resultados estão de acordo com as condições e padrões para efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários conforme a Resolução 430 do CONAMA (BRASIL, 2011).

A Figura 3 mostra a simulação atual para condutividade no rio Jaú, com valores calculados e observados no trecho estudado, indicando uma concentração praticamente constante deste parâmetro. Já, o perfil de concentração de oxigênio dissolvido ao longo do trecho estudado, resultante da aplicação do modelo, mostra que o padrão mínimo exigido pela legislação ambiental (CONAMA 357/05) de 4 mg O₂/L, para rios enquadrados em Classe 3, está sendo atendido. Estas altas concentrações foram resultantes das baixas cargas orgânicas afluentes em toda a bacia, confirmadas pelos baixos valores de DBO nos períodos estudados.

As concentrações de cloreto e nitrato observadas e calculadas pelo modelo para os períodos simulados estão representadas na Figura 3. O modelo mostra picos de cloreto e nitrato no ponto de lançamento de

esgoto doméstico da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE). No entanto, os valores de cloreto e nitrato encontram-se bem abaixo do limite estabelecido exigido pela legislação ambiental (CONAMA 357/05) para rios de classe 3, 250 mg/L e 10 mg/L respectivamente.

O nitrogênio orgânico pode ser parcialmente convertido em amônia, através do processo de amonificação, e não implica em consumo de oxigênio. O nitrogênio amoniacal é convertido, em um primeiro estágio, em nitrito por um grupo de bactérias nitrificadoras chamadas *Nitrosomonas.*, e, posteriormente, em um segundo estágio, em nitrato por um grupo conhecido por *Nitrobacter*. Este processo de oxidação chamado nitrificação (ou demanda bioquímica de oxigênio nitrogenada) pode gerar sérias depleções nos níveis de oxigênio do corpo d'água (GONÇALVES, 2009). Na Figura 3 pode ser observada a redução na concentração de amônia ao longo do trecho estudado, e aumento da concentração de nitrato ao longo do curso d'água, indicando que o consumo de oxigênio dissolvido no período chuvoso, pode estar sendo influenciado, também, pela nitrificação.

As concentrações de DBO observadas e calculadas pelo modelo para os períodos simulados estão apresentadas na Figura 3. Os valores de DBO foram inferiores ao limite de 10 mg/L fixado pela Resolução 357 do CONAMA (BRASIL, 2005) para a Classe 3. O modelo mostra picos de DBO quando ocorre a entrada dos efluentes domésticos lançados pela Estação de Tratamento de Esgotos (ETE). No entanto, as concentrações tendem a diminuir ao longo do trecho estudado do rio Jaú.

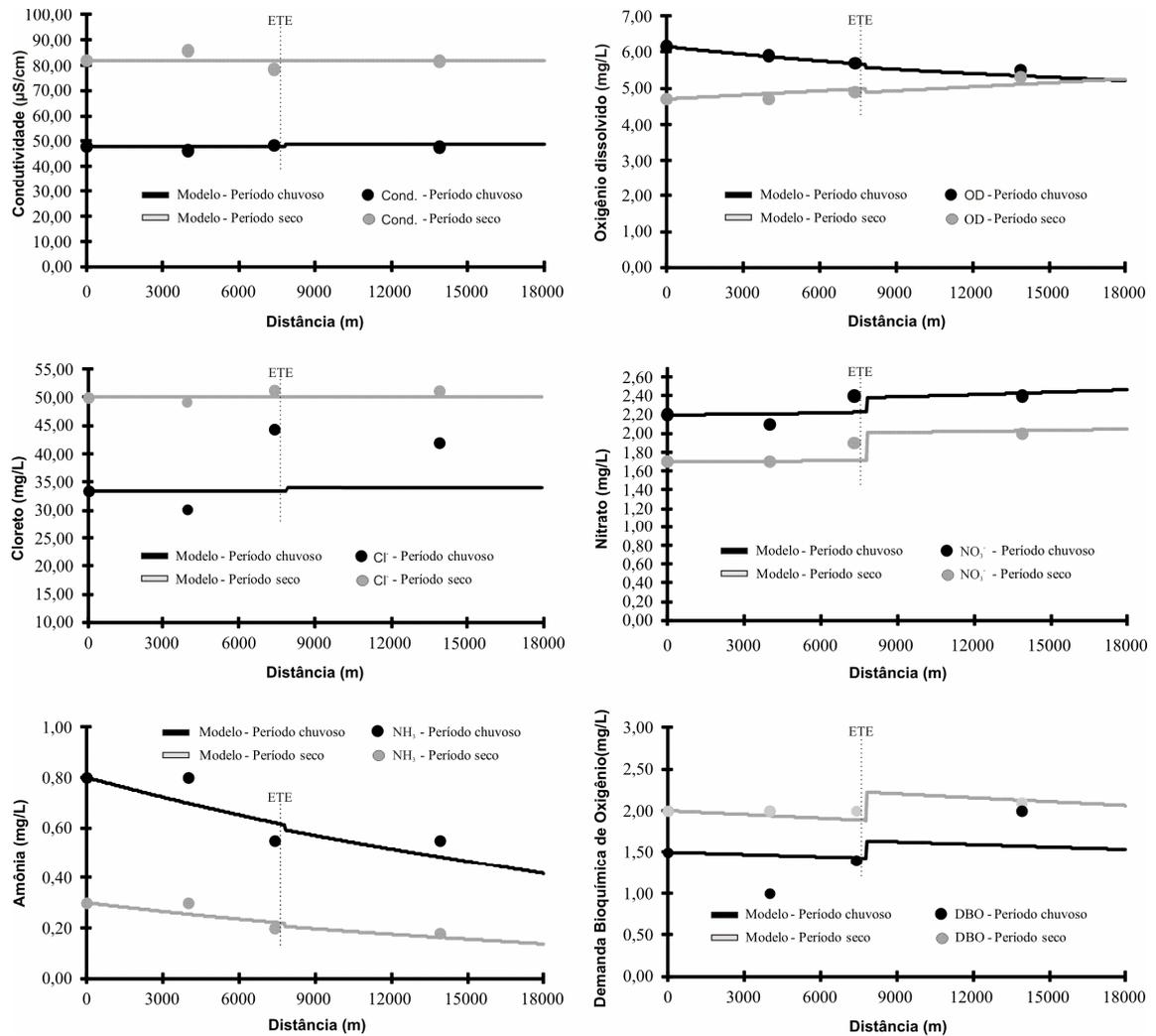


Figura 3 - Perfis longitudinais das variáveis, condutividade, oxigênio dissolvido, cloreto, nitrato, amônia, e demanda bioquímica de oxigênio, simuladas no rio Jaú através do modelo proposto.

5 Considerações finais

O rio Jaú que drena o município de Jaú (125.469 habitantes) é formado por dois principais afluentes, Ribeirão São João e Ribeirão do Bugio, que drenam as cidades de Mineiros do Tietê (11.760 habitantes) e Dois Córregos (24.384 habitantes) respectivamente. Os resultados da avaliação da qualidade da água conduzida no trecho urbano do rio Jaú (P1 – montante do município de Jaú; P2 – área urbana de Jaú; P3 – jusante da área urbana; e P4 – jusante da área urbana, próximo ao exutório do rio Jaú), levaram em conta parâmetros (temperatura, pH, condutividade, turbidez, sólidos totais em suspensão, oxigênio dissolvido, cloreto, nitrato, amônia e demanda bioquímica de oxigênio) que

permitem a avaliação de alterações na qualidade das águas fluviais durante o período chuvoso e seco, indicando que apesar da sazonalidade de alguns parâmetros, as águas do rio Jaú estão dentro dos padrões estabelecidos pela legislação ambiental vigente.

O modelo construído para a simulação de condutividade, das concentrações de oxigênio dissolvido, cloreto, nitrato, amônia e demanda bioquímica de oxigênio, ao longo do comprimento do rio, ajustou-se bem às amostras experimentais observadas. Dessa forma, o modelo pode ser utilizado por gestores da bacia em estudo visando à obtenção de cenários, como, por exemplo, estimar a capacidade do sistema de receber efluentes, além de quantificar os impactos

causados por determinadas ações pontuais, que auxiliem na solução de problemas referentes à gestão de recursos hídricos. O bom ajuste entre o modelo e os dados deve-se, também, ao fato que a fonte pontual (Estação de Tratamento de Esgotos do município de Jaú) foi utilizada como parâmetro de calibração. Os coeficientes cinéticos estimados no processo de calibração encontram-se na faixa de valores sugerida pelo QUAL2E, um dos modelos mais utilizados no meio técnico-científico.

O rio Jaú é enquadrado como de Classe 3 ao longo do trecho urbano estudado e os parâmetros observados na avaliação da qualidade da água e na investigação através da simulação da qualidade da água mostram que o padrão mínimo exigido pela legislação ambiental (CONAMA 357/05) está sendo atendido. Assim, recomenda-se, como um estudo futuro, a validação do modelo, com o intuito de avaliar o ajuste do modelo a condições diferentes daquelas usadas na calibração.

6 Numerical model for water quality simulation at the Jaú river urban stretch, Jaú city (SP)

Abstract: *Since 1925, with the emergence of the Streeter-Phelps, model mathematical models are used to estimate the concentration parameters of water quality in urban watersheds, since these places that have a wide range of environmental problems. Thus, this study evaluated and simulated during the rainy season (March) and dry season (August), the conductivity, the concentration of dissolved oxygen, chloride, ammonia, nitrate and biochemical oxygen demand concentration in the water of the Jaú river, at the urban stretch that crosses the Jaú city (SP). The results indicated that despite the seasonality of some parameters, the water of the Jaú river is within the standards set by the environmental legislation. The good fit between the model results and the experimental data indicates that the model can be used in studies aiming to obtain scenarios, such as the ability of the systems to receive wastewater, as well as quantify the impacts caused by point source action. The Jaú river is framed as a "Class 3" river. However, a future study is recommended to subsidize a proposed reclassification of this water body.*

Key-words: Watershed, Water Quality Assessment, Mathematical Modeling, Jau river Basin.

7 Referências

APHA American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed, Byrd Prepress Springfield, 698p., 1995.

BARBOSA JR, A.R. **Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamentos naturais da água**. Tese apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, 457p, 1997.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Variáveis de qualidade das águas**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 19 jun. 2005.

SÃO PAULO (Estado). CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprova o regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e Controle da Poluição do Meio Ambiente**. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/portugu es_leis_dec.asp>. Acesso em: 26 out. 2010.

CHAPRA, S.C. **Surface Water Quality Modeling**. MacGraw-Hill, 844p, 1997.

CONCEIÇÃO, F. T., SARDINHA, D. S.; SOUZA, A. D. G.; BONOTTO, D. M. Hydrochemical relationships at Meio Stream Watershed, Leme, São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, 37(2):p.390-401, 2007.

ESPÍNDOLA, E.L.G. **A Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho**. Rima, São Carlos, 188p. 2000.

ESTEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. Interciência, 2 ed. Rio de Janeiro, 602p. 1998.

FEHIDRO. Fundo Estadual de Recursos Hídricos. IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê Jacaré – CBH – TJ. Relatório, 40.674**. São Paulo: FEHIDRO, IPT, 331p, 2006.

GASTALDINI, M. C. C.; SEFFRIN, G. F. F.; PAZ, M. F. Diagnóstico atual e previsão futura da qualidade das águas do rio Ibicuí utilizando o modelo QUAL2E. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 129-138, 2002.

GONÇALVES, J. C. S. I., GERALDI, V. V. L., COSTA, D. J. L., GIORGETTI, M. F.

Aplicação de modelo numérico para a simulação da qualidade da água do córrego Retiro Saudoso - SP In: XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 2010, Punta Del Este. XXIV Congresso latinoamericano de Hidráulica., 2010.

GONÇALVES, J.C.S.I. **Desenvolvimento de modelo numérico para a simulação da qualidade da água em rios utilizando o software Vensim PLE®**. Dissertação apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, 203p, 2009.

GONÇALVES, J.C.S.I.; DIBIAZI, A.L.B.; SOUZA, A.D.G.; PENNER, G.C. O uso do modelo QUAL2K como subsídio à seleção de alternativas de tratamento de esgotos - Estudo de Caso: Município de São Simão-SP. **Revista Unira**, v. 12, n. 2, p. 37-54, 2009.

HERMES, L.C.; SILVA, A.S. **Avaliação da qualidade das águas: manual prático**. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 55p. 2004.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de dados: o Brasil município por município**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/cidades>>. Acesso em: 07 out.2009.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000**. São Paulo: IPT, V 2, série monografias, 5, 180p, 1981.

LIMA, C.A. A. **O uso do modelo Q2K na simulação da qualidade das águas do Rio Jacaré-Guaçu**. Dissertação apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, 179p, 1997.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 357 de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em 09 ago. 2005.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONAMA – Conselho Nacional do Meio

Ambiente. **Resolução CONAMA 430 de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 02 out. 2011.

ORLOB, G.T. **Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes and Reservoirs**. John Wiley & Sons, 518p, 1993.

PORTO F. A. Estabelecimento dos parâmetros de controle da poluição. In: Porto S.M.; Cleary R.W.; Coimbra R.M; Eiger S.; Luca S.J.; Nogueira V.P.O.; Porto F.A. **Hidrologia Ambiental**. São Paulo, EDUSP, p. 375-390, 1991.

SARDINHA D.S.; CONCEIÇÃO F.T.; SOUZA A.D.G., SILVEIRA A., DE JULIO M., GONÇALVES J.C.S.I. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme (SP). **Engenharia Sanitária e Ambiental**. V.13, n. 3, p. 329-338, 2008.

THOMANN, R.V.; MUELLER, J.A. **Principles of Surface Water Quality Modeling and Control**. New York: Harper & Row, Publisher, 644p, 1987.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 652p., 1998.

USEPA - United States Environmental Protection Agency . **Total maximum daily load for nutrients Deep Run, Beach Run, and Elizabeth Run Lebanon County, Pennsylvania**. Philadelphia, Pennsylvania, 77p. 2004.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Modeling report for total maximum daily load for Skippack Creek, Montgomery County, Pennsylvania**. Philadelphia, Pennsylvania, 108p., 2005.

8 Agradecimentos

Os autores agradecem aos relatores anônimos pelos comentários e sugestões que nos ajudaram a melhorar este manuscrito.