

APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS QUAL2E E STREETER-PHELPS PARA A SIMULAÇÃO DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÓPEBA - MG

Mauro da Costa Val¹ Marcos von Sperling² Nilo de Oliveira Nascimento³

Resumo - O presente trabalho teve como objetivo analisar a aplicabilidade do modelo QUAL2E da Agência de Proteção Ambiental Norte Americana – EPA para o balanço de oxigênio dissolvido em um trecho correspondente a aproximadamente metade da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, afluente do rio São Francisco em sua porção mais de montante. Neste trabalho foram realizadas 171 rodadas do QUAL2E em um processo de calibração por tentativa e erro, em dois cenários de simulação considerados representativos: período seco e período chuvoso. O trecho simulado tem 243 km de extensão total, tendo sido simulado um total de 496 km, considerando-se os tributários contidos neste porção. O modelo QUAL2E mostrou-se perfeitamente aplicável para a bacia hidrográfica estudada, alcançando-se bons resultados na simulação do OD, tal como aferido pelo coeficiente de determinação. A utilização de simplificações do modelo, até a simulação com modelo simplificado com apenas duas variáveis de estado, como o modelo de Streeter-Phelps, apresentou também resultados satisfatórios

Abstract – The present paper investigates water quality model QUAL2E in its complete version (all oxygen demanding and producing components included) and in sequentially simplified versions (excluding sedimentation, benthic demand and/or nitrogen cycle). A case study is investigated, comprising River Paraopeba, a large river with 510 km of length and various tributaries, which crosses the metropolitan area of Belo Horizonte, the third largest in Brazil. A reach with a length of 240 km was the subject of the modeling studies, its selection being a result of better data availability, as well as of its location with respect to the main sources of pollution in the metropolitan area. Historical data have been used to calibrate and validate the model. Two different

¹ Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos na Universidade Federal de Minas Gerais, mcostaval@uol.com.br

² Doutor em Engenharia Ambiental, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno, 842/7^o andar, Centro, Belo Horizonte, (31) 3238-1935, marcos@desa.ufmg.br

³ Doutor em Engenharia, Professor Adjunto do Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno, 842/7^o andar, Centro, Belo Horizonte, (31) 3238-1872, niloon@ehr.ufmg.br

periods are investigated in the paper: dry period (April to September) and wet period (October to March). The relevance of the paper lies in the conclusion that, with the proper selection of coefficients, a simpler model can give almost the same results as a more complete one. Naturally each simulation is case specific, but the large size and diversity of the catchment area studied allows extrapolation for a wide variety of similar situations in developing countries world-wide.

Palavras-Chave - Qualidade das Águas; Modelagem Matemática; QUAL2E.

INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos, como preconizada pela Lei Federal 9433/97 e pela Lei Estadual 13.199/99, estabelece instrumentos de gestão visando proporcionar cenário equilibrado aos múltiplos usos das águas, garantindo qualidade e quantidade satisfatórias para as gerações futuras. A simulação da qualidade pode ser utilizada como um instrumento de gestão adicional, visto ter a possibilidade de explicitar efeitos futuros, em um grupo expressivo de parâmetros de qualidade, decorrentes de eventuais alternativas de intervenções que se queiram implementar para gerenciamento e controle vinculados à capacidade de assimilação do curso d'água superficial em análise. Para tanto, torna-se necessário analisar a aplicabilidade do instrumento considerando-se as limitações de informações e de recursos disponíveis, como é o caso de países em desenvolvimento.

Neste trabalho foram realizadas 171 rodadas do QUAL2E em um processo de calibração por tentativa e erro em dois cenários de simulação considerados representativos: período seco e período chuvoso. O rio Paraopeba tem 510 km de extensão. O trecho simulado representou 243 km do Rio Paraopeba e um total de 496 km, considerando-se os tributários contidos neste porção. Inicialmente utilizou-se o equacionamento completo original do QUAL2E, com as fontes e drenos da demanda bioquímica de oxigênio carbonácea e do ciclo do nitrogênio, computando-se o alívio no balanço de oxigênio devido à sedimentação e o acréscimo devido à demanda de sedimentos. Posteriormente desconsiderou-se, em etapas, cada uma das demandas do equacionamento original do QUAL2E, até chegar-se à análise do balanço através de uma modelagem simplificada, similar ao equacionamento original de Streeter-Phelps. O ajuste dos resultados das simulações aos dados observados foi feito para cada um dos conjuntos de valores do coeficiente de desoxigenação, K_1 e do coeficiente de reaeração atmosférica, K_2 , através da técnica analítica do coeficiente de determinação – CD. Os dados experimentais foram obtidos fruto do gerenciamento e monitoramento realizados pelo poder

público estadual através dos órgãos seccionais Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM e Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais – SEMAD.

EQUACIONAMENTO ORIGINAL DO MODELO DE SIMULAÇÃO QUAL2E

A equação diferencial usada no QUAL2E para descrever a taxa de mudança do oxigênio, desprezando-se os fatores relativos a algas, é mostrada abaixo.

$$dO / dt = K_2 (O^* - O) - (K_1 - K_3)L - K_4/d - \alpha_5 \beta_1 N_1 - \alpha_6 \beta_2 N_2 \quad (1)$$

onde:

O = concentração de oxigênio dissolvido, mg/l

O* = saturação de oxigênio dissolvido na temperatura e pressão locais, mg/l

α_5 = taxa de consumo de oxigênio por unidade de amônia oxidada, mgO/mg-N

α_6 = taxa de consumo de oxigênio por unidade de nitrito oxidado, mgO/mg-N

L = concentração de DBO última carbonácea, mg/l

d = profundidade média do curso d'água superficial, m

K_1 = coeficiente de desoxigenação de DBO carbonácea, dependente da temperatura, dia⁻¹

K_2 = coeficiente de reaeração de acordo com a analogia de difusão de Fick, dependente da temperatura, dia⁻¹

K_3 = coeficiente de perda de DBO última devido à sedimentação, dia⁻¹

K_4 = taxa de demanda de oxigênio do sedimento, dependente da temperatura, g/m²-dia

β_1 = coeficiente de oxidação da amônia, dependente da temperatura, dia⁻¹

β_2 = coeficiente de oxidação do nitrito, dependente da temperatura, dia⁻¹

N_1 = concentração de nitrogênio amônia, mgN/l

N_2 = concentração de nitrogênio nitrito, mgN/l

Ciclo do nitrogênio

Em águas naturais, ocorre uma transformação em etapas do nitrogênio orgânico para amônia, para nitrito e, finalmente, para nitrato. O ciclo do nitrogênio no QUAL2E contém os quatro

componentes. As equações diferenciais que governam a transformação do nitrogênio de uma forma para a outra estão mostradas a seguir.

$$\text{Nitrogênio orgânico} - dN_4 / dt = \beta_3 N_4 - \sigma_4 N_4 \quad (2)$$

$$\text{Nitrogênio amônia} - dN_1 / dt = \beta_3 N_4 - \beta_1 N_1 + \sigma_3 / d \quad (3)$$

$$\text{Nitrogênio nitrito} - dN_2 / dt = \beta_1 N_1 - \beta_2 N_2 \quad (4)$$

$$\text{Nitrogênio nitrato} - dN_3 / dt = \beta_2 N_2, \quad (5)$$

onde:

β_3 = coeficiente de hidrólise do nitrogênio orgânico para amônia, dia⁻¹

N_4 = concentração de nitrogênio orgânico, mgN/l

σ_4 = coeficiente de sedimentação do nitrogênio orgânico, dia⁻¹

N_1 = concentração de nitrogênio amônia, mgN/l

N_3 = concentração de nitrogênio nitrato, mgN/l

N_4 = concentração de nitrogênio orgânico, mgN/l

β_1 = coeficiente de oxidação da amônia, dependente da temperatura, dia⁻¹

β_3 = coeficiente de hidrólise do nitrogênio orgânico para amônia, dia⁻¹

σ_3 = coeficiente de fonte bentônica de nitrogênio amônia, mgN/m².dia

d = profundidade média do curso d'água superficial, m

N_2 = concentração de nitrogênio nitrito, mgN/l

β_2 = coeficiente de oxidação do nitrito, dependente da temperatura, dia⁻¹

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO ATRAVÉS DO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

A avaliação de desempenho do modelo, para cada um dos arquivos de saída (rodada) foi baseada na comparação entre os valores médios observados e os valores estimados. O grau de ajuste entre os valores citados foi calculado pelo Coeficiente de Determinação (CD), dado por Mendenhall & Sencich (apud Von Sperling, 1990), equacionado como segue:

$$CD = 1 - [\sum (y_{\text{observ.}} - y_{\text{estim.}})^2] / [\sum (y_{\text{observ.}} - y_{\text{méd.}})^2] \quad (6)$$

onde:

$y_{\text{observ.}}$ = valor do OD observado

$y_{\text{estim.}}$ = valor do OD estimado

$y_{\text{méd.}}$ = média dos valores observados

Neste contexto, os valores de CD podem variar entre $-\infty$ e 1. Para valores positivos de CD ($0 \leq \text{CD} \leq 1$), o valor representa a fração da variância total do valor observado que é explicada pelo modelo. CD igual a 1 indica perfeito ajuste entre as variáveis observadas e estimadas e CD igual a zero indica que o modelo está se desenvolvendo não melhor que uma linha constante que passa pela média do conjunto dos pontos observados. Se a “soma dos resíduos dos quadrados” é uma medida absoluta da aderência (fidelidade), CD é um número relativo e pode ser comparado com os resultados de outras simulações ou outras variáveis (provando que as limitações citadas foram consideradas nos cálculos). Baseado em todas estas considerações, decidiu-se adotar CD como o critério para definição de desempenho do modelo.

TRECHO DE ESTUDO

A escolha do trecho a ser simulado baseou-se na sua importância no contexto regional, na disponibilidade de informações acerca das suas características hidráulicas, pontos de monitoramento de vazão - séries históricas – e pontos de monitoramento da qualidade das águas, como também nas limitações do modelo QUAL2E.

As informações hidráulicas primárias foram fatores limitantes para a aplicação do modelo, posto que através delas foram definidos aspectos da rede hidrográfica, tais como definição dos trechos e elementos computacionais, além de parâmetros, como velocidade e vazões médias dos períodos hidrológicos considerados, quais sejam, chuvoso (meses de outubro a março) e seco (meses de abril a setembro).

Desta feita, escolheu-se o trecho de Belo Vale até a chamada Ponte da Taquara, entre os municípios de Caetanópolis e Papagaios. A extensão total da calha do rio Paraopeba neste trecho é de 243 quilômetros.

Há seis tributários na sua margem esquerda, quais sejam, rio Macaubas, ribeirão Águas Claras, rio Manso, córrego São Joaquim e ribeirões Mateus Leme e Lajes. Em sua margem direita há outros nove tributários, respectivamente, ribeirões Barra da Boa Esperança, Contendas, Marinhos, Piedade, Casa Branca, Sarzedo, Betim, rio Grande e ribeirão dos Macacos.

As sedes urbanas dos municípios cujo território se localiza no trecho, em um total de 19, são os seguintes, de montante para jusante, Belo Vale, Moeda, Piedade dos Gerais, Brumadinho, Bonfim, Crucilândia, Itatiaiuçu, Rio Manso, Ibirité, Sarzedo, Mário Campos, Igarapé, São Joaquim

de Bicas, Betim, Mateus Leme, Juatuba, Florestal, Esmeraldas Fortuna de Minas e Cachoeira da Prata.

VALORES ADOTADOS PARA O COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

Foram utilizados dois métodos para a obtenção de um valor para o coeficiente K_2 , quais sejam:

- Valores médios tabelados
- Valores em função das características hidráulicas do corpo d'água

Os valores médios tabelados (primeiro método) utilizados foram os sugeridos por Arceivala (1981), como apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores Médios do Coeficiente de Reaeração Atmosférica

Corpos d'água	K_2 (dia ⁻¹)	
	Profundo	Raso
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagarosos, grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixa velocidade	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15
Corredeiras e quedas d'água	> 1,15	> 1,61

Os valores selecionados pelo segundo método (K_2 em função das características hidráulicas) apresentados respeitam as faixas de velocidade e profundidade, segundo os equacionamentos realizados pelos pesquisadores Thackston e Krenkel (apud Bowie et alli, 1985), Owens *et al.* (apud Bowie et alli, 1985), O'Connor e Dobbins e Churchill *et al.* (apud von Sperling, 1996). Tais equacionamentos, apropriados para as características hidráulicas do rio Paraopeba, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Formulações para o cálculo do Coeficiente de Reaeração

Pesquisador	Equacionamento	Faixa aplicável de profundidade (H) e velocidade (V)
O'Connor e Dobbins	$3,73 \cdot (V^{0,5}) \cdot (H^{-1,5})$	$0,6 \text{ m} \leq H \leq 4,0 \text{ m}$ e $0,05 \text{ m/s} \leq V \leq 0,8 \text{ m/s}$
Churchill <i>et al.</i>	$5 \cdot (V^{0,97}) \cdot (H^{-1,67})$	$0,6 \text{ m} \leq H \leq 4,0 \text{ m}$ e $0,8 \text{ m} \leq V \leq 1,5 \text{ m}$
Owens <i>et al.</i>	$5,3 \cdot (V^{0,67}) \cdot (H^{-1,85})$	$0,1 \text{ m} \leq H \leq 0,6 \text{ m}$ e $0,05 \text{ m/s} \leq V \leq 1,5 \text{ m/s}$
Thackston e Krenkel (*)	$\{24,9 \cdot [1 + (F)^{0,5}] \cdot u\} / H$	$0,015 \text{ m} \leq H \leq 0,7 \text{ m}$

(*): $F = U / (g \cdot h)^{0,5}$ e $= (g \cdot R \cdot i)^{0,6}$, (**): V = velocidade, H = profundidade, R = raio hidráulico, g = aceleração da gravidade, i = declividade, F = número de Froude e U = velocidade média

VALORES ADOTADOS PARA O COEFICIENTE DE DESOXIGENAÇÃO

O modelo QUAL2E assume uma reação de primeira ordem para descrever a desoxigenação da DBO carbonácea última no curso d'água. A função DBO como expressa no QUAL2E também considera uma remoção adicional devido à sedimentação, que não exerce demanda de oxigênio:

$$dL / dt = - K_1 L - K_3 L \quad (7)$$

onde:

L = concentração da DBO carbonácea última, mg/L

K_1 = coeficiente de desoxigenação, dependente da temperatura, dia⁻¹

K_3 = taxa de perda da DBO carbonácea devido à sedimentação, dependente da temperatura, dia⁻¹

Segundo von Sperling (1996), o coeficiente de desoxigenação K_1 depende das características da matéria orgânica, além da temperatura e da presença de substâncias inibidoras. Efluentes tratados, por exemplo, possuem uma taxa de degradação mais lenta, pelo fato da maior parte da matéria orgânica mais facilmente assimilável já ter sido removida, restando apenas a parcela de estabilização mais vagarosa.

Valores médios de K_1 , de acordo com a origem da matéria orgânica, podem assumir valores entre 0,09 a 0,45 dia⁻¹, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Valores típicos de K_1 (base e, 20°C)

Origem	K_1 (dia ⁻¹)
Água residuária concentrada	0,35 – 0,45
Água residuária de baixa concentração	0,30 – 0,40
Efluente primário	0,30 – 0,40
Efluente secundário	0,12 – 0,24
Rios com águas limpas	0,09 – 0,21
Água para abastecimento público	< 0,12

Fonte: Adaptado de Fair et al., 1973; Arceivala, 1981 (apud von Sperling, 1996)

DADOS DE ENTRADA

No trecho escolhido para a aplicação do modelo Qual2E de simulação da qualidade estão localizadas nove das 14 estações de qualidade mantidas pelo poder público estadual na bacia hidrográfica do rio Paraopeba e sete estações de quantidade. Das nove estações de qualidade, foram utilizadas informações geradas por sete delas, visto que as outras duas estão situadas em tributários

(ribeirões Betim e Macacos). Das setes estações de monitoramento de parâmetros hidráulicos e relativos à quantidade das águas, foram utilizadas informações de quatro delas, quais sejam, Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova e Ponte Taquara.

A Tabela 4 apresenta um resumo das vazões médias para os períodos completo, seco e chuvoso, nas 4 estações de monitoramento.

Tabela 4 – Vazões médias no trecho em estudo

Estação Ponto de Controle	Área de Drenagem (km²)	Vazão média no período completo (m³/s)	Vazão média no período seco (m³/s)	Vazão média no período chuvoso (m³/s)
Belo Vale – PC1	2820	48,77	30,11	68,36
Alberto Flores – PC2	4030	61,20	38,61	84,11
Ponte Nova – PC3	5830	86,31	54,53	118,68
Ponte Taquara – PC4	8910	116,5	66,92	169,37

Dados de monitoramento da qualidade das águas no rio Paraopeba

Foram utilizadas séries temporais de dados de monitoramento de parâmetros de qualidade das águas, fornecidos pela Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, dos anos de 1993 a 1999.

Tabela 5. Estação de qualidade e sua localização municipal e no trecho sob estudo

Estação de Qualidade - Rio Paraopeba Localização municipal	Localização no trecho (km)
BP029 – Sede urbana de Belo Vale	0
BP036 – Melo Franco em Brumadinho	62
BP068 – Fecho do Funil na divisa de Igarapé, Brumadinho e Ibirité	88
BP070 – Jusante da foz do Ribeirão Sarzedo em São Joaquim de Bicas	105
BP072 – Jusante da foz do Rio Betim em Betim	122
BP082 – Cachoeirinha em Esmeraldas	186
BP083 – Logo após a foz do Ribeirão Macacos em Papagaios	242

Tabela 6. Valores médios de parâmetros de qualidade das águas por estação de monitoramento.

Localização - Estação	Período Seco			Período Chuvoso		
	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Temperatura (°C)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Temperatura (°C)
Melo Franco	7,86	1,03	21,1	6,98	1,08	24,20
Fecho do Funil	8,01	1,50	20,93	7,00	2,15	24,21
Jusante foz Rib. Sarzedo	7,66	1,47	21,40	6,85	1,02	24,33
Jusante foz Rib. Betim	7,66	1,84	21,27	6,92	2,49	24,13
Cachoeirinha	7,07	1,02	22,20	6,56	4,51	24,93
Logo após foz do Rib. Macacos	7,35	1,57	21,77	6,55	4,92	24,47

SIMULAÇÕES EFETUADAS

Simulações para o período seco

Foram realizadas 171 simulações, entre período seco e chuvoso, objetivando-se alcançar o melhor ajuste aos dados experimentais. Realizou-se um processo de calibração por tentativas e erros.

A Tabela 7 apresenta os melhores resultados do coeficiente de determinação para as rodadas de simulação no período seco.

Utilizando-se da estrutura do equacionamento do balanço de oxigênio do QUAL2E, excetuando-se a simulação de algas, denominou-se como simulação com o modelo QUAL2E completo aquelas onde se considerou a reaeração atmosférica, a desoxigenação pelo exercício da demanda bioquímica de oxigênio, a demanda bentônica de oxigênio, a oxidação da amônia para nitrito e a oxidação do nitrito para nitrato.

Por outro lado, buscou-se, também, análise de modelos mais simplificados, do tipo ‘Streeter-Phelps’, através da consideração das parcelas estruturais do equacionamento do QUAL2E correspondentes ao equacionamento original do referido modelo precursor dos estudos de balanço de oxigênio em cursos d’água superficiais. Tal ocorreu ao se considerar apenas o exercício da DBO e a reaeração atmosférica, desprezando-se o consumo de oxigênio exercido pelo ciclo do nitrogênio, os efeitos da sedimentação da DBO e a demanda bentônica de oxigênio.

A utilização de modelos mais simplificados se justifica, principalmente em países em desenvolvimento, em decorrência das dificuldades ainda encontradas para obtenção de taxas e coeficientes cinéticos diretamente aferidos para as condições locais, por motivos vários, entre os quais a escassez de recursos para pesquisa. Não há dados primários disponíveis para aplicação de modelos com estruturas mais complexas.

Desta feita, a Tabela 7 apresenta o grau de ajuste, aferido pelo conceito de coeficiente de determinação, os melhores resultados das simulações para o período seco, em dois blocos, quais sejam, com a utilização do modelo QUAL2E completo e do modelo QUAL2E simplificado.

Cabe salientar que nas rodadas iniciais foram utilizados valores do coeficiente de desoxigenação, K_1 , de 0,15, 0,25 e 0,35 dia^{-1} , valores estes baseados nos resultados práticos obtidos por von Sperling em rios da região metropolitana de Belo Horizonte, onde encontra-se parte da porção simulada do rio Paraopeba no presente trabalho.

A partir das primeiras simulações, de acordo com o comportamento da curva de oxigênio dissolvido obtida, comparada com os dados experimentais, efetuaram-se modificações nos valores do coeficiente de desoxigenação visando-se alcançar a convergência máxima possível, indicada pelos valores do coeficiente de determinação mais próximos do valor unitário (1,0).

Tabela 7 – Simulações realizadas para o período seco

Rodada no.	Especificação	K ₂	K ₁	Coeficiente de determinação (CD)
Modelo QUAL2E Completo				
80	Demanda completa de O2	Arceivala	0,15	0,7336
81			0,25	0,716
45			0,35	0,665
83	Demanda completa de O2	Owens e Churchill (Paraopeba) e Owens (Tributários)	0,15	0,107
84			0,25	0,118
85			0,35	0,170
86	Demanda completa de O2	Thackston & Krenkel	0,15	0,121
87			0,25	0,135
88			0,35	0,152
94	Demanda completa de O2	Arceivala	0,13	0,730
97			0,18	0,7286
96			0,20	0,729
98			0,16	0,7334
95			0,17	0,7346
Modelo QUAL2E Simplificado				
112	Sem sedimentação de DBO e ciclo do N	Arceivala	0,17	0,668
113	Sem demanda bentônica		0,17	0,516
114	Sem ciclo do N		0,17	0,566
115	Sem sedimentação, demanda bentônica e ciclo do N		0,17	0,322
128	Sem sedimentação, demanda bentônica e ciclo do N	Arceivala	0,35	0,498
129			0,50	0,612
134			0,64	0,664
131			0,65	0,673
135			0,66	0,666
136			0,75	0,657

Os valores de K₁, K₂ e do coeficiente de determinação - CD que resultaram nas melhores simulações estão apresentados na Tabela 8. Observa-se que os valores de CD obtidos com o modelo completo e o modelo simplificado são próximos entre si.

Tabela 8. Valores de K₁, K₂ e CD das melhores simulações no período seco

Rodada no.	Especificação	K ₂	K ₁	Coeficiente de determinação (CD)
95	Modelo QUAL2E completo (Demanda completa de O2)	Arceivala	0,17	0,73
131	Modelo QUAL2E simplificado (Sem sedimentação, demanda bentônica e ciclo do N)	Arceivala	0,65	0,67

Simulação para o período chuvoso

Similarmente ao período seco, realizou-se um processo de tentativa e erro, visando-se ao melhor ajuste das curvas de oxigênio dissolvido resultantes das simulações aos dados experimentais. Foram utilizados, inicialmente, como nas simulações para o período seco, valores do

coeficiente de desoxigenação, K_1 , de 0,15, 0,25 e 0,35 dia^{-1} , fruto de resultados práticos obtidos por von Sperling em rios da região metropolitana de Belo Horizonte.

A Tabela 9 apresenta os melhores resultados do coeficiente de determinação para as rodadas de simulação no período chuvoso.

Tabela 9 – Simulações realizadas para o período chuvoso

Rodada no.	Especificação	K ₂	K ₁	Coeficiente de determinação (CD)
Modelo QUAL2E Completo				
99	Demanda completa de O2	Arceivala	0,15	-0,042
100			0,25	-0,032
142			0,30	-0,039
101			0,35	-0,030
141			0,40	-0,038
140			0,50	-0,048
137			0,65	-0,075
138			0,80	-0,176
139			0,95	-0,297
102	Demanda completa de O2	Arceivala reduzido em 1/3	0,15	0,537
103			0,25	0,706
104			0,35	0,747
143	Demanda completa de O2	Arceivala reduzido em 2/3	0,05	0,396
105			0,15	0,334
110			0,25	0,281
111			0,35	0,240
53	Demanda completa de O2	Thackston & Krenkel (Paraopeba) e Churchill (Tributários)	0,15	0,054
50			0,25	0,061
47			0,35	0,066
54	Demanda completa de O2	Thackston & Krenkel	0,15	0,034
51			0,25	0,038
48			0,35	0,048
106	Demanda completa de O2	Arceivala reduzido em 1/3	0,33	0,739
109			0,34	0,733
108			0,36	0,731
107			0,37	0,723
Modelo QUAL2E Simplificado				
116	Sem sedimentação de DBO e N	Arceivala reduzido em 1/3	0,35	0,729
117	Sem demanda bentônica de DBO e NH3		0,35	0,337
118	Sem ciclo do N		0,35	0,041
119	Sem sedimentação e demanda bentônica de DBO e ciclo do N		0,35	0,049
148			0,5	0,123
158			0,65	0,178
149			0,75	0,220
150			0,85	0,188
154			0,76	0,204
155			0,74	0,193
123			Sem sedimentação e demanda bentônica de DBO e ciclo do N	Arceivala reduzido em 2/3
127	0,19	0,725		
124	0,20	0,735		
126	0,21	0,732		
122			0,25	0,728

Tabela 10 - Valores de K_1 , K_2 e CD das melhores simulações no período chuvoso

Rodada no.	Especificação	K_2	K_1	Coeficiente de determinação (CD)
104	Modelo QUAL2E completo Demanda completa de O2	Arceivala reduzido em 1/3	0,35	0,75

124	Modelo QUAL2E simplificado Sem sedimentação e demanda bentônica de DBO e ciclo do N	Arceivala reduzido em 2/3	0,20	0,74
-----	--	---------------------------	------	------

CONCLUSÕES

O modelo de simulação da qualidade das águas de rios QUAL2E mostrou-se perfeitamente aplicável para a bacia hidrográfica estudada. Apesar de sua estrutura complexa, nas simulações para o balanço de oxigênio os resultados alcançados foram bons, aferidos pelo coeficiente de determinação. Para sua utilização como instrumento de gestão auxiliar às tomadas de decisão nas instâncias colegiadas, como os Comitês de Bacia, conforme previsto na Lei Federal 9.433/97, faz-se necessário maior conhecimento e fortalecimento de aspectos de gerenciamento das águas tais como cadastramento dos usuários, maior número de pontos de monitoramento da quantidade e quantidade, dentre outros. Por outro lado, a utilização de simplificações do modelo, até a simulação com modelo simplificado com apenas duas variáveis de estado, como o modelo de Streeter-Phelps, apresentou resultados satisfatórios, conforme atestado pelo ajuste medido através do coeficiente de determinação. Para países em desenvolvimento, onde recursos são escassos e freqüentemente não se dispõe de informações e pesquisas sobre coeficientes cinéticos aferidos “in loco” e dados de monitoramento nem sempre estão disponíveis, pode ser uma opção viável o uso de modelos mais simplificados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, L.C. ; BARNWELL Jr., T.O. 1987. Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E. and QUAL2E-UNCAS. *Report EPA/600/3-87/007*. US Enviromental Protection Agency, Athens, Georgia, USA.
- BOWIE, G.L. ; MILLS, W.B. ; PORCELLA, D.B. ; CAMPBELL, C.L. ; PAGENKOPF, J.R. ; RUPP, G.L. ; JOHNSON, K.M. ; CAHN, W.H. ; GHERINI S.A. , 1985. Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (Second Edition). *Report EPA/600/3-85/040*. . US Enviromental Protection Agency, Athens, Georgia, USA.
- ARCEIVALA, S.J., 1981. Wastewater treatment and Disposal, Engineering and Ecology in Pollution Control. Regional Office for Southeast Asia, World Helth Organization, New Delhi, India.
- VON SPERLING, M., 1990. Optimal Management of the Oxidation Ditch Process. PhD Thesis, Imperial College, Univ. Londres.

VON SPERLING, M., 1996. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos (2ª edição)*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.