

IV-262 – AVALIAÇÃO INTEGRADA DA QUALIDADE DA ÁGUA EM MICROBACIA CÁRSTICA COM USO DO MODELO Qual2Kw

Rodrigo de Arruda Camargo⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa. Mestrando em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa.

Maria Lúcia Calijuri

Profª titular da UFV. Graduada em Engenharia Civil pela EESC – USP.

Aníbal da Fonseca Santiago

Doutorando em Saneamento Ambiental pela UFV. Graduado em Engenharia Ambiental pela UFV.

Marcos Dornelas Freitas Machado e Silva

Doutorando em Saneamento Ambiental pela UFV. Graduado em Engenharia Ambiental pela UFV.

Eduardo de Aguiar do Couto

Mestrando em Saneamento Ambiental pela UFV. Graduado em Engenharia Ambiental pela UFV.

Endereço⁽¹⁾: Rua Gomes Barbosa, 418 apto 101 - Centro - Viçosa - MG - CEP: 36570-000 - Brasil - Tel: (31) 38919794 - e-mail: rodrigodeacamargo@gmail.com

RESUMO

A microbacia do córrego do Fidalgo situa-se no complexo aeroportuário do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (AITN), MG. Desde sua construção, o AITN atraiu a instalação de indústrias e loteamentos residenciais sem que a região oferecesse condições básicas de infra-estrutura. Este trabalho teve por objetivo analisar os impactos da atividade antrópica nos recursos hídricos e avaliar cenários frente à pressão provocada pela expansão do aeroporto assegurando as condições mínimas para a sobrevivência das espécies aquáticas. Utilizou-se o QUAL2Kw para a modelagem da qualidade da água. A calibração do modelo foi realizada no período chuvoso e validada para o período seco. A utilização de períodos distintos foi proposta para confirmar a aplicabilidade do modelo durante o ano. O modelo demonstrou ser capaz de representar com habilidade e flexibilidade os aspectos físicos, químicos e hidráulicos observados na microbacia do córrego do Fidalgo. Os parâmetros temperatura, pH, CE, SST e alcalinidade apresentaram os melhores ajustes entre as previsões do modelo e os dados observados em campo. O menor valor de OD obtido na calibração foi de mg/L e na confirmação de 4,97 mg/L, valores superiores ao mínimo estabelecido de mg/L para conservação das espécies aquáticas. Os limites de DBO, NT e PT são atingidos com um acréscimo de carga na microbacia de 0,361 kg/d, 0,022 kg/d e 0,010 kg/d, respectivamente. A conservação dos recursos hídricos dessa região cárstica deve ser efetivada com a adoção de medidas preventivas, como a cobertura de solos expostos e a diminuição do influxo de nutrientes de origem agrícola ou pecuária.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade da Água, Regiões Cársticas, Modelagem, QUAL2Kw

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização é reconhecido como o principal fator que contribui com os problemas ambientais, incluindo as inundações, a perda de biodiversidade, e a degradação dos ecossistemas aquáticos (FU et. al., 2008). Esses impactos, decorrentes da mudança de cobertura do solo e da intensificação da atividade humana devido à urbanização, geralmente são decorrentes de modificações nas condições hidráulicas do rio, no aumento da carga difusa e descarga de fontes pontuais de poluentes, e redução do fluxo de base durante os períodos de estiagem (BUTLER & DAVIES, 2004; OLIVERA & DEFEE, 2007).

Numerosos estudos sugerem que a qualidade da água superficial é afetada pelas características da cobertura do solo encontradas dentro da área de drenagem da bacia hidrográfica (LIMBURG e SCHMIDT, 1990; JONES et al., 1999; Bis et al., 2000; RIVA-MURRAY et al., 2002; WOODCOCK et al., 2006; CHANG, 2008). A deterioração dos cursos d'água resulta no decréscimo da concentração de oxigênio dissolvido devido ao metabolismo dos poluentes pelos microrganismos, oxidações químicas e respiração de plantas, algas e fitoplâncton (DROLIC e KONKAN, 1996). Os impactos da baixa concentração de oxigênio dissolvido ou, no extremo, as condições anaeróbicas são um ecossistema desequilibrado com a mortalidade de peixes, odores e danos estéticos (COX, 2003).

Uma alternativa para estimativa do impacto de despejos na qualidade das águas em rios é a utilização de modelos matemáticos, prática que tem crescido drasticamente nos últimos anos e vem se consolidando como uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos (DROLIC e KONKAN, 1996).

Os modelos matemáticos são técnicas que permitem representar propostas alternativas 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 uma importante ferramenta de simulação, onde o conhecimento torna-se essencial para que as proposições e os resultados sejam representativos e coerentes com a realidade (TUCCI, 1998).

Pelletier et al. (2006) desenvolveu o modelo QUAL2Kw. Trata-se de um sistema unidimensional em estado estacionário, onde novos elementos, que incluem a interação do oxigênio com as plantas fixas, o metabolismo *hyporheic*, a redução da DBO devido à desnitrificação e o sistema de auto-calibração, foram acrescentados. O modelo QUAL2Kw modifica o QUAL2K, 2003, desenvolvido por Chapra e Pelletier (2003).

Estudos mostram que a implantação do complexo aeroportuário do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, AITN, provocou a alteração do vetor de crescimento da região metropolitana de Belo Horizonte - Brasil, e atraiu a instalação de indústrias e loteamentos residenciais sem o provimento de condições básicas de infraestrutura. Além disso, a implantação da sede administrativa do governo estadual reforçou essa tendência de crescimento. Porém, a ocupação urbana nessa região traz sérias preocupações ambientais, por tratar-se de região cárstica.

Para Williams (1993), ambientes cársticos estão entre os ambientes naturais mais frágeis do mundo, e são extremamente susceptíveis a qualquer mudança. A alta vulnerabilidade à contaminação é ocasionada pela ausência de elementos de filtração, possibilitando que a contaminação possa assumir proporções alarmantes, caso os poluentes sejam capturados por um sistema de condutos subterrâneos e levados para longas distâncias. Este trabalho teve por objetivo analisar os impactos da atividade antrópica nos recursos hídricos e avaliar cenários frente à pressão provocada, assegurando as condições mínimas para a sobrevivência das espécies aquáticas.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A microbacia do córrego do Fidalgo situa-se no complexo aeroportuário do AITN, região metropolitana de Belo Horizonte, e está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste Lagoa Santa. Possui área de 7,12 km², e o estudo contemplou 4,2 km deste córrego. A localização da área de estudo e das estações de monitoramento estão apresentadas na Figura 1.

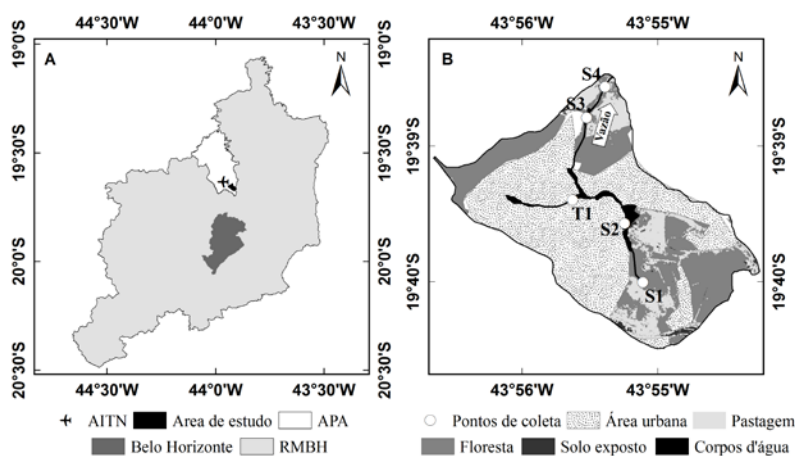


Figura 1: Localização da área de estudo e das estações de monitoramento

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Lagoa Santa e seu entorno planáltico enquadra-se na categoria Aw, ou seja, clima quente com temperatura do mês mais frio superior a 18 °C, e duas estações alternadas, uma chuvosa (verão), e outra seca (inverno), com amplitudes térmicas anuais inferiores a 5 °C (RIBEIRO, 1995). A precipitação média anual corresponde a 1286,5 mm, concentrando-se no trimestre de novembro a janeiro. A altitude varia de 718 a 847 metros acima do nível médio do mar.

Desde sua construção na década de 70 do século passado, o AITN atua como indutor do desenvolvimento urbano, propiciando a vetorização da expansão e ocupação urbana em sua direção. A implantação de loteamentos residenciais na microbacia alterou o regime hidráulico do córrego do Fidalgo, devido à construção de barragens, passando o ambiente do estado lótico para lântico.

As principais ameaças à qualidade da água provêm da ocupação inadequada e falta de saneamento básico. Entre os principais usos da água observados destacam-se a recreação primária e secundária, a dessedentação de animais, a pesca esportiva e irrigação.

OBTENÇÃO DOS DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

As estações de monitoramento apresentadas na Figura 1 compreendem quatro estações ao longo do córrego do Fidalgo e uma estação no entroncamento com seu tributário. Os detalhes das estações de monitoramento encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Estações de monitoramento da qualidade da água no córrego do Fidalgo e tributário

Tipo	Estação (Abreviação)	Km	Localização
Rio Principal	Nascente (S1)	0,000	Parque Nascente Córrego do Fidalgo
	Cond. Amendoeiras (S2)	1,480	Lagoa principal do Condomínio Estância das Amendoeiras
	Cond. Condados (S3)	3,000	Lagoa próxima ao poço de captação no Condomínio Residencial Condados da Lagoa
	Faz. Olhos D'água (S4)	3,769	Ponte sobre o córrego do Fidalgo na Fazenda Olhos D'água
Tributário	Afluente (T1)	1,980	A montante da confluência com o córrego do Fidalgo

Para a aplicação no QUAL2Kw os trabalhos de monitoramento foram realizados no período chuvoso e seco. A calibração do modelo foi realizada no período chuvoso, entre os dias 21 a 23 de Março de 2009, e validada para o período seco, em coleta realizada entre os dias 20 e 23 de Julho de 2009. A escolha entre períodos distintos para a calibração e confirmação foi proposta para confirmar a baixa variação dos dados limnológicos e a aplicabilidade do modelo para qualquer época do ano. O trabalho de campo consistiu na coleta de uma única amostra em cada estação em horários variados.

As variáveis físicas e químicas medidas no estudo incluem vazão, temperatura da água, pH, condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD), sólidos dissolvidos totais (SDT), alcalinidade total (Alcalinidade), nitrogênio orgânico (Norg), amônia (NH₃), nitrato (NO₃), fósforo total (PT), demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), e *Escherichia coli* como indicadora de contaminação fecal (*E. coli*). As amostras de água foram recolhidas, transportadas e analisadas de acordo com os métodos descritos em APHA-AWWA-WPCF (1995) e USGS (1974).

MODELO QUAL2KW

O QUAL2Kw baseia-se em equações diferenciais ordinárias para sistemas unidimensionais e de fluxo constante. Realiza-se no QUAL2Kw o balanço de massa para cada constituinte do modelo, exceto para variáveis relacionadas às algas de fundo. Os elementos computacionais são considerados reatores de mistura completa, cuja sucessão pelos elementos seguintes permite representar a evolução da qualidade da água ao longo do curso d'água (PELLETIER et al., 2006). A Figura 2 apresenta esquematicamente o balanço de massa que ocorre em um elemento computacional.

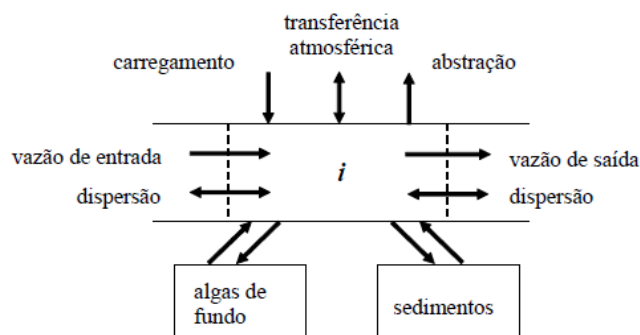


Figura 2: Balanço de massa em uma extensão de segmento i (Adaptado de PELLETIER AND CHAPRA, 2005).

Para a auto-calibração, o modelo utiliza algoritmo genérico (AG) para maximizar o ajuste entre os resultados simulados pelo modelo e os dados medidos em campo. O melhor ajuste é obtido através do inverso da raiz do erro médio quadrático (REMQ), obtido pela menor diferença entre as previsões do modelo e os dados observados para os diferentes parâmetros a serem analisados (KANNEL et. al., 2007).

MODELO DE CALIBRAÇÃO E CORFIMAÇÃO

Discretização do Córrego

Dos 4,2 km do córrego do Fidalgo selecionados a partir de sua nascente, foi possível a discretização em 41 segmentos. A Figura 3 mostra o sistema de segmentação do córrego com a localização do afluente.

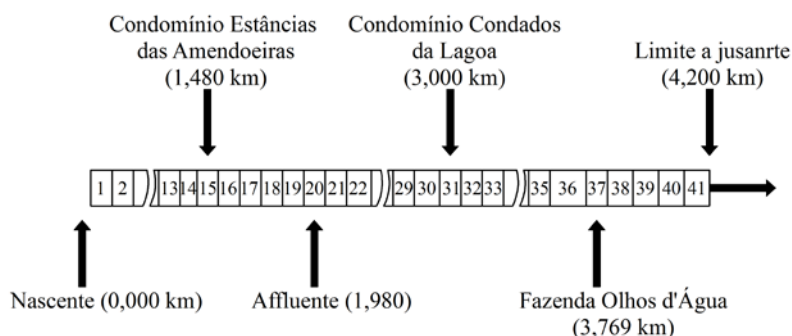


Figura 3: Discretização do trecho modelado do córrego do Fidalgo

Dados de Entrada

O modelo permite a entrada das características hidráulicas de cada elemento computacional do rio. Utilizou-se a equação de Manning para obtenção das características hidráulicas, velocidade média e profundidade função da largura, declividade de fundo, taludes e coeficiente de rugosidade de Manning. Os conjuntos de segmentos (1-14, 15-29, 30-36 e 37-41) com respectivas características hidráulicas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Características hidráulicas dos pontos de monitoramento ao longo do córrego do Fidalgo

Localização	Elementos computacionais	Declividade do canal	Coefficiente de Manning (n)	Largura do canal	Talude esquerdo	Talude Direito
0,000	0-14	0,0061	0,07	0,3	0,00	0,00
1,480	15-29	0,0046	0,07	0,3	0,00	0,00
3,000	30-36	0,0169	0,07	0,3	1,08	1,00
3,769	37-41	0,0020	0,07	0,3	0,43	0,00

Os parâmetros de entrada incluídos no modelo foram vazão, temperatura, pH, SDT, CE, OD, DBO, Norg, NH_3 , NO_3 , fósforo total, alcalinidade e *E. coli*.

As coberturas das algas de fundo e da demanda de oxigênio pelo sedimento de fundo foram assumidas como 100 %. A densidade da zona sedimento/*hyporheic*, porosidade do sedimento e a troca no fluxo *hyporheic* foram assumidas como sendo 10 cm, 40% e 5%, respectivamente. Os trechos foram caracterizados pela contribuição de suas fontes pontuais e difusas. O córrego afluente foi considerado como fonte pontual e teve seus dados limnológicos e de vazão incorporados na modelagem.

Os dados meteorológicos necessários para a modelagem foram obtidos a partir da estação meteorológica do AITN. Obteve-se os valores de temperatura do ar, velocidade do vento e porcentagem de nuvens nos períodos correspondentes as realizações das coletas.

Parâmetros Cinéticos

A Tabela 3 apresenta os parâmetros cinéticos recomendados na literatura e utilizados no processo de calibração do modelo de qualidade da água (USEPA, 1985; PELLETIER AND CHAPRA, 2005; BROWN AND BARNWELL, 1987).

Tabela 3: Parâmetros cinéticos utilizados na modelagem do córrego do Fidalgo

Parâmetro	Valor	Unidade	Auto-Calibração	Valor Mínimo	Valor Máximo
Estequiometria					
Carbono	40	gC	No	30	50
Nitrogênio	7,2	gN	No	3	9
Fósforo	1	gP	No	0,4	2
Peso Seco	100	gD	No	100	100
Clorofila	1	gA	No	0,4	2
Sólidos inorgânicos suspensos					
Velocidade de sedimentação	0,3938	m/d	Yes	0	2
Nitrogênio orgânico					
Hidrólise	3,457	d ⁻¹	Yes	0	5
Velocidade de sedimentação	0,42036	m/d	Yes	0	2
Nitrogênio amoniacal					
Nitrificação	9,919	d ⁻¹	Yes	0	10
Nitrato					
Desnitrificação	0,00314	d ⁻¹	Yes	0	2
Coefficiente de transferência do Sedimento para a desnitrificação	0,21261	m/d	Yes	0	1
Fósforo orgânico					
Hidrólise	1,4742	d ⁻¹	Yes	0	2
Velocidade de sedimentação	1,0932	m/d	Yes	0	2
Fósforo inorgânico					
Velocidade de sedimentação	1,97116	m/d	Yes	0	2
Constante de atenuação média do sedimento P e oxigênio	1,18454	mgO ₂ /L	Yes	0	2
Patógenos					
Taxa de decaimento	1,9943	d ⁻¹	Yes	0	5
Velocidade de sedimentação	4,80405	m/d	Yes	0	5
Constante alpha para mortalidade por luz	0,10692	/d/ly/hr	Yes	0	3
pH					
Pressão parcial do dióxido de carbono	347	ppm			

Para o cálculo do coeficiente de desoxigenação (K_1) utilizou-se o método de regressão não linear. Para a obtenção de K_1 e L_0 ajustou-se uma curva teórica aos vários pontos experimentais de t e DBO (VON SPERLING, 2007). Para cada um dos trechos considerados na modelagem utilizou-se a equação de Streeter-Phelps modificada para o cálculo do K_2 (LIMA, 2005). A Tabela 4 apresenta os valores de K_1 e K_2 utilizados para cada trecho.

Tabela 4: Parâmetros cinéticos dos pontos de monitoramento ao longo do córrego do Fidalgo

Localização	Elementos computacionais	K ₁	K ₂
0,000	0-14	0,313	0,175
1,480	15-29	0,141	0,496
3,000	30-36	0,196	0,667
3,769	37-41	0,184	0,581

O modelo exponencial foi escolhido para a inibição de oxigênio devido a oxidação da DBO, nitrificação, desnitrificação e respiração realizada pelas algas de fundo e plantas aquáticas. Os outros parâmetros foram estabelecidos como padrão no QUAL2Kw.

Implementação do Modelo

Os dados medidos no período chuvoso foram utilizados para calibração. O passo de tempo usado para o cálculo foi fixado em 1.40625 min para evitar a instabilidade no modelo. A solução de integração foi feita com o método de Euler (para a modelagem do pH utilizou-se o método de Newton-Raphson).

Para as simulações de troca na hyporheic zone optou-se pelo nível 1, por incluir as reações de ordem-zero e primeira ordem da DBO dissolvida de oxidação rápida. Para o melhor ajuste, o sistema de modelagem atribui pesos padrão para vários parâmetros a fim de minimizar o erro entre os valores medidos em campo e os simulados pelo modelo. Utilizou-se peso 50 para o parâmetro OD por ser o mais influente, peso 2 foi dado para temperatura, pH, DBO, Nitrogênio orgânico, amoniacal e na forma nítrica e fósforo orgânico e inorgânico e os demais parâmetros receberam peso 1 (KANNEL et. al., 2007).

Executou-se o algoritmo genético para um tamanho de população de 100, com 50 gerações em evolução, até a obtenção da menor diferença entre os resultados simulados e os medidos em campo. Segundo Pelletier et. al. (2006), a execução numa população de 100 tem melhor desempenho do que números menores e, aproximadamente, a mesma dimensão de uma população de 500.

A fim de testar a capacidade do modelo calibrado para prever as condições da qualidade da água em diferentes períodos hidrológicos, executou-se a modelagem para o período seco sem alterar os parâmetros calibrados para o período chuvoso. Em seguida, o modelo foi utilizado para simular a qualidade da água sob diferentes alterações na microbacia durante o período chuvoso.

RESULTADOS

CALIBRAÇÃO E CONFIRMAÇÃO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os resultados de qualidade da água medidos em campo para o período chuvoso, de 21 a 23 de Março de 2009, são mostrados na Tabela 5. Na Figura 4 observa-se a simulação dos parâmetros monitorados para o córrego do Fidalgo.

Tabela 5: Parâmetros de qualidade da água medidos ao longo do córrego do Fidalgo e tributário no período chuvoso

Estação	Vazão (m³/s)	Temp. (°C)	pH	CE (µs/cm)	SDT (mg/L)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	Norg (mg/L)	NH ₃ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PT (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	<i>E. coli</i> (UFC/100ml)
S1	0,0029	25,8	7,11	320,3	186,67	5,70	0,17	0,11	0,17	0,08	0,058	171,45	500
S2	0,0525	27,3	7,34	157,1	104,55	6,25	2,99	0,10	0,14	0,04	0,016	87,16	12
S3	0,1068	27,4	7,29	140,0	97,73	5,40	0,58	0,24	0,14	0,15	0,017	74,99	80
S4	0,1014	25,8	6,68	140,1	95,91	6,60	0,77	0,11	0,09	0,11	0,016	78,79	100
T1	0,0165	26,7	7,73	51,4	32,27	6,60	1,00	0,10	0,09	0,01	0,04	47,27	300

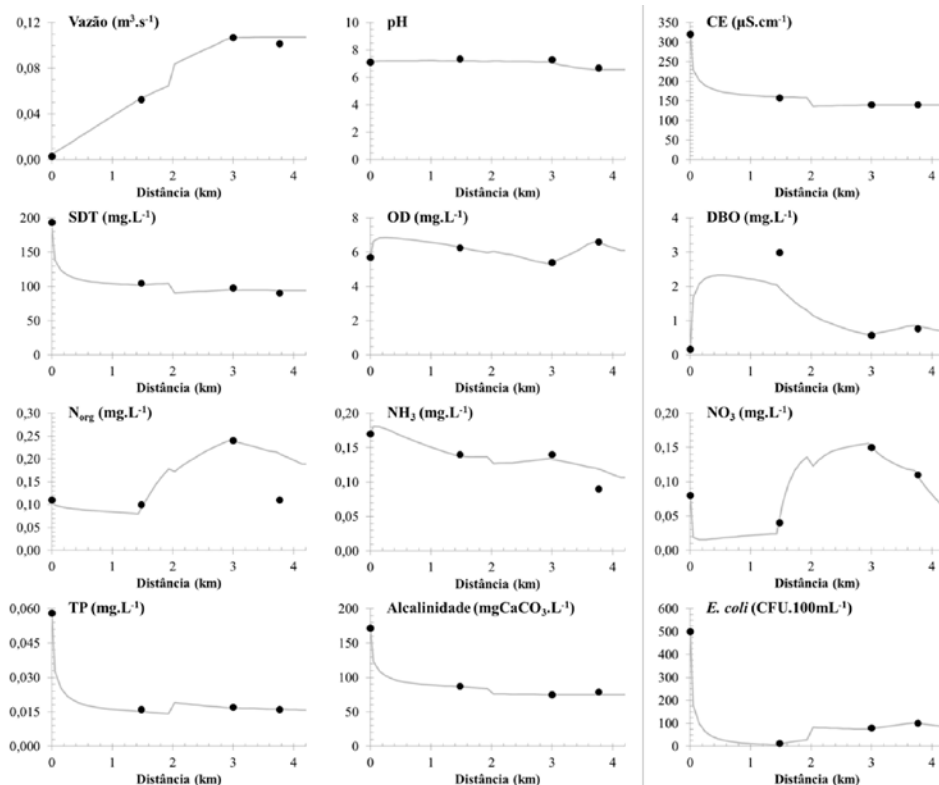


Figura 4: Resultado da simulação do modelo para o período chuvoso (calibração)

A qualidade da água na nascente não difere dos pontos a jusante para os parâmetros temperatura, pH, OD e nitrogênio amoniacal. Os parâmetros CE, ST, fósforo orgânico, fósforo inorgânico, alcalinidade e *E. coli* apresentaram maiores valores na nascente e decresceram com a distância.

A nascente caracteriza-se por ser um pequeno lago, onde constantemente observa-se a presença de bovinos e caprinos, que possivelmente contribuem significativamente com a qualidade da água neste ponto, principalmente com as concentrações de fósforo e *E. coli*.

Para Kohler (1989), em ambientes cársticos, a dissolução das rochas calcárias eleva a quantidade de íons dissolvidos na água, pela presença de carbonatos e bicarbonatos. Assim nesse ponto, onde a água subterrânea aflora, encontraram-se os maiores valores de CE e alcalinidade.

Os resultados de qualidade da água medidos em campo para o período seco, de 20 a 23 de Julho de 2009, estão mostrados na Tabela 6. Na Figura 5 apresenta-se a simulação dos parâmetros monitorados para o córrego do Fidalgo.

Tabela 6: Parâmetros de qualidade da água medidos ao longo do córrego do Fidalgo e tributário no período seco

Estação	Vazão (m³/s)	Temp. (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	Norg (mg/L)	NH ₃ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PT (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	<i>E. coli</i> (UFC/100ml)
S1	0,0010	22,8	7,28	358,6	157,20	5,20	0,80	0,30	0,18	0,04	0,057	167,00	1
S2	0,0184	22,1	7,56	198,2	97,00	7,30	2,33	0,22	0,21	0,01	0,013	93,00	1
S3	0,0375	21,5	7,69	183,2	101,00	6,30	0,44	0,27	0,16	0,03	0,018	84,00	2
S4	0,0356	20,9	7,44	169,1	106,50	4,70	0,11	0,21	0,18	0,01	0,016	79,50	1
T1	0,0058	21,0	7,73	66,4	40,50	7,40	0,44	0,22	0,15	0,01	0,027	28,00	28

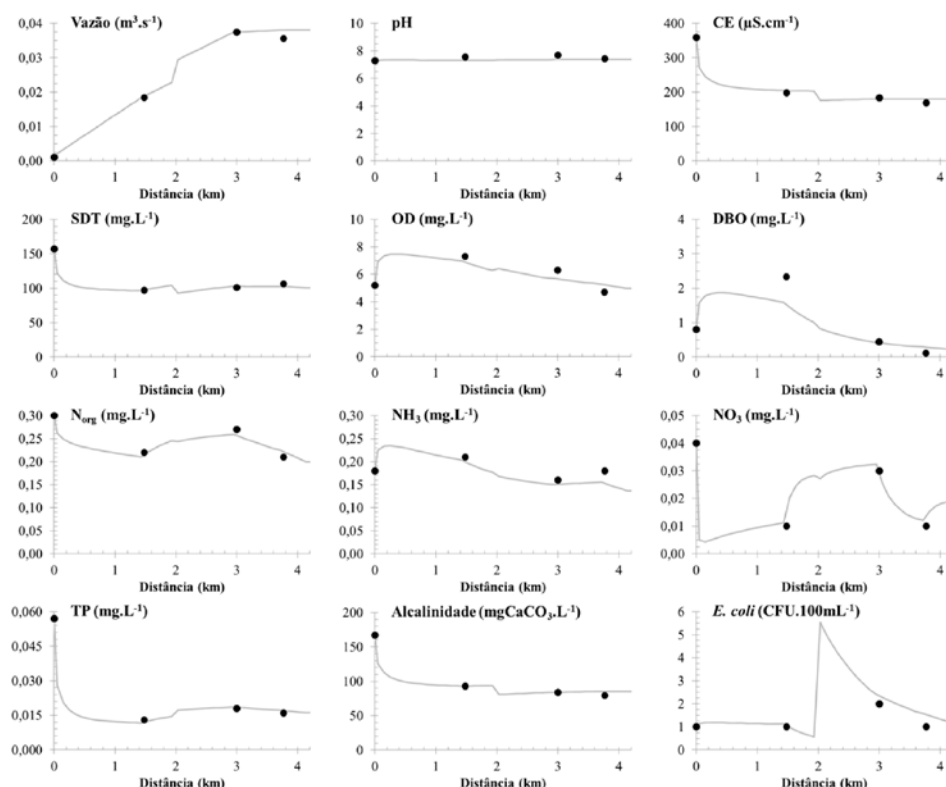


Figura 5: Resultado da simulação do modelo para o período chuvoso (confirmação)

Os resultados da confirmação mostraram o mesmo comportamento dos parâmetros simulados no período chuvoso, pouca variação para os parâmetros temperatura, pH, OD e nitrogênio amoniacal, e decréscimo dos parâmetros CE, ST, fósforo orgânico, fósforo inorgânico, alcalinidade e *E. coli* com a distância percorrida.

RAIZ DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO

As raízes do erro médio quadrático, obtida pela menor diferença entre as previsões do modelo e os dados observados, estão na Tabela 7. Os parâmetros temperatura, pH, CE, fósforo inorgânico e *E. coli* apresentaram as simulações mais próximas para o período chuvoso. No período seco, as melhores simulações ocorreram para os parâmetros temperatura, pH, CE, ST, fósforo orgânico e alcalinidade.

Tabela 7: Índice estatístico REMQ (%) para comparação dos valores medidos em relação as previsões do modelo

Parâmetro	Raiz do erro médio quadrático (REMQ) %				
			Kannel (2007)		Guedes (2009)
	Calibração	Confirmação	Calibração	Confirmação	Calibração
Vazão	4,64	5,42	4,0	3,6	-
Temperatura	1,74	1,19	8,0	21,5	-
pH	1,18	2,77	7,0	17,7	-
CE	0,85	2,81	-	-	-
SDT	2,24	1,95	-	-	-
OD	6,87	7,90	15,0	19,2	10,8
DBO	57,07	45,17	52,0	20,8	4,2
Norg	38,51	3,71	-	-	-
NH ₃	11,99	8,34	-	-	-
NO ₃	3,69	15,42	-	-	-
PT	1,62	2,90	31	42	-
Alcalinidade	2,04	2,73	-	-	-
<i>E. coli</i>	1,11	25,57	-	-	-

A raiz do erro médio quadrático entre a calibração e a confirmação variou pouco para vazão, SST e OD. As maiores variações foram observadas para pH, CE, nitrato, fósforo inorgânico e E. coli. Atribui-se essa variação a alteração na qualidade da água entre os períodos estudados. No período chuvoso, mesmo esperando maior diluição dos parâmetros simulados, observou-se que suas concentrações eram maiores que no período seco. Isso porque na área de estudo a contribuição difusa influencia significativamente a qualidade da água.

A DBO foi o parâmetro que apresentou a maior diferença entre os dados do modelo e os observados em campo. No período chuvoso, os valores simulados para S3 e S4 foram superiores aos medidos em campo, o que não ocorreu para os primeiros pontos de amostragem. Possivelmente a alternância entre ambientes lóticos e lênticos no trecho simulado tenha influência, uma vez que os pontos S1 e S2 caracterizam-se pela predominância do ambiente lótico, ao contrário de S3 e S4.

Observou-se que as lagoas formadas, aparentemente, atuam como lagoas de estabilização, auxiliando, de forma natural, a autodepuração do rio. Von Sperling (2002) explica que em ambientes lênticos, a diminuição da DBO é favorecida, pois a matéria orgânica em suspensão tende a sedimentar, vindo a contribuir com o lodo de fundo, restando somente a matéria orgânica dissolvida e a matéria orgânica em suspensão de pequenas dimensões dispersa na massa líquida.

Valores para a raiz do erro médio quadrático de outros trabalhos estão apresentados na Tabela 7. Kaneel et. al. (2007) em estudo realizado no rio Bagmati, Nepal, chegou a valores bem próximos para vazão (4,00) e DBO (52,00). A área de drenagem do trabalho desses autores pertence a uma microbacia urbana populosa, com despejo de efluentes industriais, domésticos e hospitalares, elevadas cargas de matéria orgânica e nutrientes, e baixa concentração de OD ao longo do curso d'água.

Guedes (2009) em estudo realizado no rio Pomba, Brasil, encontrou valor próximo para OD (10.8 mg/L). Trata-se de uma bacia rural, com desenvolvimento industrial pontual em algumas cidades. A deterioração da qualidade da água deve-se ao lançamento in natura de despejos domésticos no curso d'água.

Como neste trabalho houve uma única coleta para cada período do ano, alguns erros na calibração do modelo são inevitáveis. Uma vez que as previsões do modelo são médias diárias, alguns parâmetros de qualidade da água, como pH e OD, podem apresentar resultados diferentes, dependentes da hora de amostragem.

Os recursos hídricos ainda não foram deteriorados de maneira severa nessa área. O menor valor de OD modelado na calibração foi de 5.54 mg/L e na confirmação de 4.97 mg/L, valores acima da concentração mínima estabelecida para a conservação das espécies aquáticas de 3 mg/L (NOVOTNY, 2002).

ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DA QUALIDADE DA ÁGUA

Avaliou-se os parâmetros de qualidade da água ao longo do córrego do Fidalgo com a modificação da vazão difusa, aumento da carga de DBO e nutrientes, para estabelecer limites aos critérios de qualidade, orientados para a sobrevivência das espécies aquáticas: OD mínimo de 4 mg/L, DBO₅ máxima de 5 mg/L, nitrogênio total (NT) de 1,5 mg/L, PT de 0,075 mg/L (USEPA, 2000).

Os cenários gerados no córrego do Fidalgo baseiam-se nas possíveis modificações da contribuição difusa frente à ocupação antrópica da microbacia com a instalação de zonas industriais e loteamentos residenciais. As alterações no uso do solo afetam a capacidade de infiltração, a condutividade hidráulica e a capacidade de retenção de água no solo, alterando o volume de água escoado para os cursos d'água. As situações propostas, assim como, os resultados de qualidade da água estão na Tabela 8.

Tabela 8: Qualidade da água após acréscimo da contribuição difusa

Acréscimo da contribuição difusa	Resultados para qualidade da água (mg/L)			
	OD mín	DBOu máx	NT máx	PT máx
Caso Base	5,54	2,33	0,53	0,058
1 m ³ /s + 2 mg/L DBO ₅	5,53	4,97	1,39	0,058
1 m ³ /s + 2 mg/L DBO ₅ + 0,12 mg/L NT	5,42	4,97	1,51	0,058
1 m ³ /s + 2 mg/L DBO ₅ + 0,12 mg/L NT + 0,054 mg/L PT	5,42	4,97	1,51	0,075
1 m ³ /s + 2 mg/L DBO ₅ + 0,60 mg/L NT + 0,120 mg/L PT	4,86	4,97	1,94	0,146
1 m ³ /s + 5 mg/L DBO ₅	5,49	7,94	1,39	0,058
1 m ³ /s + 5 mg/L DBO ₅ + 0,12 mg/L NT + 0,054 mg/L PT	5,38	7,94	1,51	0,075
1 m ³ /s + 5 mg/L DBO ₅ + 0,60 mg/L NT + 0,120 mg/L PT	4,80	7,94	1,94	0,146

O limite para as concentrações de NT e PT no córrego do Fidalgo é atingido quando ocorre acréscimo na contribuição difusa de 0,12 mg/L e 0,054 mg/L, respectivamente. Essas concentrações correspondem a um incremento de carga na microbacia de 0,022 kg/d de nitrogênio e 0,010 kg/d de fósforo.

O limite de 5 mg/L de DBO₅ é atingido quando ocorre acréscimo na contribuição difusa de 2 mg/L, ou 0,361 kg/d. Em nenhuma das simulações a concentração de OD na água atingiu o limite inferior de 4 mg/L.

CONCLUSÕES

A modelagem no QUAL2Kw demonstrou ser capaz de representar com habilidade e flexibilidade os aspectos físicos, químicos e hidráulicos observados na microbacia do córrego do Fidalgo.

Na área de estudo, a alteração da qualidade das águas superficiais devem-se principalmente a poluição difusa de origem rural. Os resultados para a calibração e confirmação mostraram que a qualidade da água na nascente não difere dos pontos a jusante para os parâmetros temperatura, pH, OD e nitrogênio amoniacal. Os parâmetros CE, ST, fósforo orgânico, fósforo inorgânico, alcalinidade e *E. coli* apresentaram maiores concentrações na nascente e decresceram com a distância.

Os parâmetros temperatura, pH, CE, SST e alcalinidade apresentaram os melhores ajustes entre as previsões do modelo e os dados observados em campo. A DBO foi o parâmetro que apresentou a maior diferença entre os dados do modelo e os observados em campo. Possivelmente as lagoas formadas atuam como lagoas de estabilização, auxiliando, de forma natural, a autodepuração do rio.

Apesar do crescimento populacional observado na região e a instalação de zonas industriais e loteamentos residenciais, os recursos hídricos ainda não foram deteriorados de maneira severa. O menor valor de OD modelado na calibração foi de 5,54 mg/L e na confirmação de 4,97 mg/L, valores superiores ao mínimo estabelecido de 3 mg/L para conservação das espécies aquáticas. Os limites de DBO, NT e PT são atingidos com um acréscimo de carga na microbacia de 0,361 kg/d, 0,022 kg/d e 0,010 kg/d, respectivamente.

Diante disso, medidas preventivas, como a cobertura de solos expostos e a diminuição do influxo de nutrientes de origem agrícola ou pecuária, devem ser efetivas com vistas à conservação dos recursos hídricos dessa região cárstica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA-AWWA-WPCF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 19th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington, DC, 1995.
2. Bis, B., Zdanowicz, A., Zalewski, M. Effects of catchment properties on hydrochemistry, habitat complexity and invertebrate community structure in a Lowland River. *Hydrobiology* 422 (423), 369–387, 2000.
3. Brown, L. C., Barnwell, T. O. Jr. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual. USEPA, Environmental Research Laboratory, Athens, GA, EPA/600/3-87/007, 1987.

4. Butler D., Davies J W. Urban Drainage. 2nd ed. London: Spon Press, 2004.
5. Chapra, S. C., Pelletier, G. J. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Beta Version): Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, 2003.
6. Chang, H. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin. South Korea, Water Res. 42, pp. 3285–3304, 2008.
7. Cox, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. Sci. Total Environ. 314–316, 335–377, 2003.
8. Drolc, A., Konkan, J. Z. Z. Water quality modeling of the river Sava, Slovenia. Water Res. 30 (11), 2587–2592, 1996.
9. Fu, G., Butler, D., e Khu, S.-T. The impact of new developments on river water quality from an integrated system modelling perspective. Science of the total environment, 407, pp 1257-1267, 2009.
10. Guedes, H. A. S. ; Silva, D. D. ; Oliveira, I. de C. e ; Ribeiro, C. B. M. ; Elesbon, A. A. A. . Estudo da capacidade de autodepuração do rio Pomba utilizando o modelo QUAL2Kw. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. O Desafio da Prática da Sustentabilidade na Gestão dos Recursos Hídricos: Natureza, Gente e Desenvolvimento, 2009.
11. Jones, E. B. D., Helfman, G.S., Harper, J. O., Bolstad, P. V. Effects of riparian forest removal on fish assemblages in Southern Appalachian streams. Conservation Biology 13 (6), 1454–1465, 1999.
12. Kannel, P. R., Lee, S., Kanel, S. R., Lee, Y., Ahn, K.-H. Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. Environ. Monit. Assess. 125, 201–217, 2007.
13. KOHLER, H. C. Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa, MG. 1989. 113f. Tese (Doutoramento em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciência Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1989.
14. Lima, J. P. Parâmetros de qualidade de águas superficiais. Nota de aula: Introdução à Engenharia do Ambiente – Folha 2: Poluição hídrica. Universidade de Coimbra. Portugal. 2005.
15. Limburg, K. E., Schmidt, R. E. Patterns of fish spawning in Hudson River tributaries: response to an urban gradient. Ecology 71 (4), 1238–1245, 1990.
16. Novotny, V. Water Quality: Diffusion Pollution and Watershed Management. Wiley, Hoboken, NJ, 2002.
17. Olivera F., DeFee B B. Urbanization and its effect on runoff in the Whiteoak Bayou watershed. Texas. J Am Water Resour Assoc; 43(1):170–82, 2007
18. Pelletier, G. J., Chapra, C. S. QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1), A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, 2005. Retrieved 7 April 2010 from: <http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models/>.
19. Pelletier, G. J., Chapra, C. S., Tao, H. QUAL2Kw, A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. Environ. Model. Software 21, 419–4125, 2006.
20. RIBEIRO, C.M. 1995. O clima no Planalto de Lagoa Santa-MG. Em: Estudos ambientais e propostas de manejo, na região do carste, no Planalto de Lagoa Santa. Projeto FAPEMIG: CEX-1133/90. Relatório Final. Parte 2. v.1. Coord. Heinz Charles Kohler.
21. Riva-Murray, K., Bode, R.W., Phillips, P.J., Wall, G.L. Impact source determination with biomonitoring data in New York State: concordance with environmental data. Northeastern Naturalist 9 (2), 127–162 , 2002.
22. Tucci, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Editora da Universidade, 669p, 1998.
23. USEPA - Environmental Protection Agency. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Rivers and Streams. EPA Document No. 822-B-00-002, 2000.
24. USGS. Methods for collection and analysis of water samples for dissolved minerals and gases. Techniques of Water-Resources Investigations. U.S. Geological Survey, Washington, DC, 1974.
25. Von Sperling, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Vol. 3. Lagoas de Estabilização. 2ª ed. BELO HORIZONTE: DESA-UFGM, v. 1. 196 p, 2002.
26. Von Sperling, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 7. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFGM, v. 1. 588 p, 2007.
27. Williams, P. W. Environmental change and human impact on karst terrains: an introduction. Catena, suppl. 25, 1-19, 1993.
28. Woodcock, T., Mihuc, T., Romanowicz, E., Allen, E. Land-use effects on catchment – and patch – scale habitat and macroinvertebrate response in the Adirondack Uplands. American Fisheries Society Symposium 48, 395–411, 2006.