

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE QUALIDADE DE ÁGUA INTEGRADO A UM SIG: APLICAÇÃO NA BACIA DO RIO DOCE

*Regina Camara Lins*¹; *Carlos André B. Mendes*²; *Alexandre E. de Carvalho*³; *Sidnei Gusmão*
*Agra*⁴ & *Carlos Ruberto Fragoso Júnior*⁵

Resumo – A crescente produção de carga orgânica e de nutrientes em bacias hidrográficas tem, historicamente, levado rios a significativas mudanças nos padrões de qualidade da água, na diversidade e riqueza biológica e nos usos nobres de suas águas. Neste trabalho avaliamos a qualidade da água na bacia do rio Doce através de um modelo hidrológico integrado a um SIG, denominado IPH-SISDEC. O modelo foi calibrado satisfatoriamente utilizando os dados de monitoramento ao longo da calha do rio Doce. O modelo hidrológico em ambiente SIG proposto mostrou ser uma ferramenta promissora e simples para investigação da qualidade da água de bacias hidrográficas sujeita a lançamentos pontuais de efluentes.

Abstract – The increase of organic and nutrient loading in water-sheds have led to significant changes in water quality pat-terns in rivers. In this work we evaluated the water quality of the Basin of River Doce basin through an hydrologic model integrated with GIS, called IPH-SISDEC. The model was calibrated using water quality monitoring data throughout River Doce extension. The hydrological model coupled with GIS environment have shown to be a simple and a promising tool to investigating water quality in basins subject to point sources of pollution.

Palavras-Chave – Modelos hidrológicos; qualidade da água; SIG.

¹ Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS): Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Caixa Postal 15029 - Porto Alegre - RS - Brasil, Fone (51) 3308-6686; Fax (51) 3308-7291, reginacamaralins@yahoo.com.br.

² Professor Adjunto do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS): Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Caixa Postal 15029 - Porto Alegre - RS - Brasil, Fone (51) 3308-6686; Fax (51) 3308-7291, mendes@iph.ufrgs.br.

³ Engenheiro Agrônomo, Consultor da Ecoplan Engenharia: Rua Felicidade de Azevedo, 924, Porto Alegre/RS - CEP 90540-110, Fone PABX (51) 3272-8900, Fax (51) 3342-3345, alexandre@ecoplan.com.br.

⁴ Engenheiro Civil (Msc), Consultor da Ecoplan Engenharia: Rua Felicidade de Azevedo, 924, Porto Alegre/RS - CEP 90540-110, Fone PABX (51) 3272-8900, Fax (51) 3342-3345, sgagra@gmail.com.

⁵ Professor Adjunto da Universidade Federal de Alagoas (CTEC/UFAL): Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins - Maceió - AL, CEP: 57072-970, Centro de Tecnologia, (82) 3214-1605, crubertofj@hotmail.com.

INTRODUÇÃO

Existe uma crescente preocupação relacionada à degradação da qualidade da água em rios promovida pelo aumento gradual da produção de carga orgânica e de nutrientes por atividades antrópicas, as quais geram fontes pontuais de poluição (e.g. lançamentos de esgotos domésticos e industriais) e difusas (e.g. cargas agrícolas) nas bacias hidrográficas (Chapra, 1997). A modelagem matemática aborda de maneira simplificada e prática os processos (hidrológicos, físicos, químicos e biológicos) complexos e, ainda, não perfeitamente equacionados (Gastaldini e Teixeira, 2003). Desta forma, modelos hidrológicos são utilizados como ferramentas para auxiliar as tomadas de decisões relativas à gestão dos recursos hídricos.

Modelos hidrológicos unidimensionais são largamente empregados para quantificar o efeito do impacto de efluentes na qualidade da água de rios (e.g. HEC-RAS, QUAL2E, SWAT). Dentre a variedade de modelos, destacam-se os que buscam integrar um ambiente automatizado a um sistema de informações inteligente, tal como um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A interação de modelos hidrológicos com SIG começou a ser desenvolvida no final da década de 80 a partir da necessidade dos usuários de SIG melhorarem a compatibilidade analítica de seus sistemas (Fotheringham & Rogerson, 1994; Goodchild *et al.*, 1992), e dos usuários dos modelos hidrológicos melhor extraírem as informações dos modelos digitais do terreno (Sui & Maggio, 1999; Pessoa, 2010). Esta integração permite reunir informações dissociadas espacialmente e, principalmente, ajuda no processo de tomada de decisão por parte do usuário, uma vez que ela admite um(a): (a) compartilhamento mais adequado de informações; (b) análise mais objetiva e um melhor entendimento dos resultados; (c) facilidade para elaboração de gráficos, mapas, tabelas; (d) melhoria na identificação de padrões; dentre outros (Lee & White, 1992; Srinivasan & Arnold, 1994; Sui & Maggio, 1999).

A avaliação da qualidade da água em rios é complexa devido não apenas a identificação das fontes de poluição a montante de um determinado trecho mas também pelos procedimentos de geoprocessamento necessários tornando o processo de mais demorado e razoavelmente trabalhoso. Isto requer um grande esforço por parte dos órgãos gestores para a análise de um novo lançamento de efluente localizado em um determinado local da bacia. Desta forma, identifica-se um alto potencial de sistematização deste processo no próprio ambiente de SIG, utilizando ferramentas já disponíveis e complementando estas com algumas funções programadas especificamente para os estudos de qualidade da água em bacias hidrográficas (Correia *et al.*, 1998).

O objetivo deste estudo foi avaliar a calibração de um modelo hidrológico de qualidade da água integrado a um SIG para a bacia do rio Doce, com a finalidade de subsidiar futura elaboração

de cenários de simulação para facilitar as análises técnicas prévias necessárias para tomada de decisões, considerando o enquadramento proposto no Plano Integrado de Recursos Hídricos da bacia do rio Doce (IGAM, 2010). Neste estudo avaliamos e discutimos a aplicabilidade do modelo IPH-SISDEC na bacia do rio Doce.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A Bacia do Rio Doce, localizada entre os paralelos 17° 45' e 21° 15' de latitude ao sul do Equador e 39° 30' e 43° 45' de longitude a oeste do meridiano de Greenwich, possui área de drenagem de 86.715 km² compreendidos entre os Estados de Minas Gerais (aproximadamente 65%) e Espírito Santo abrangendo um total de 229 municípios (Figura 1).

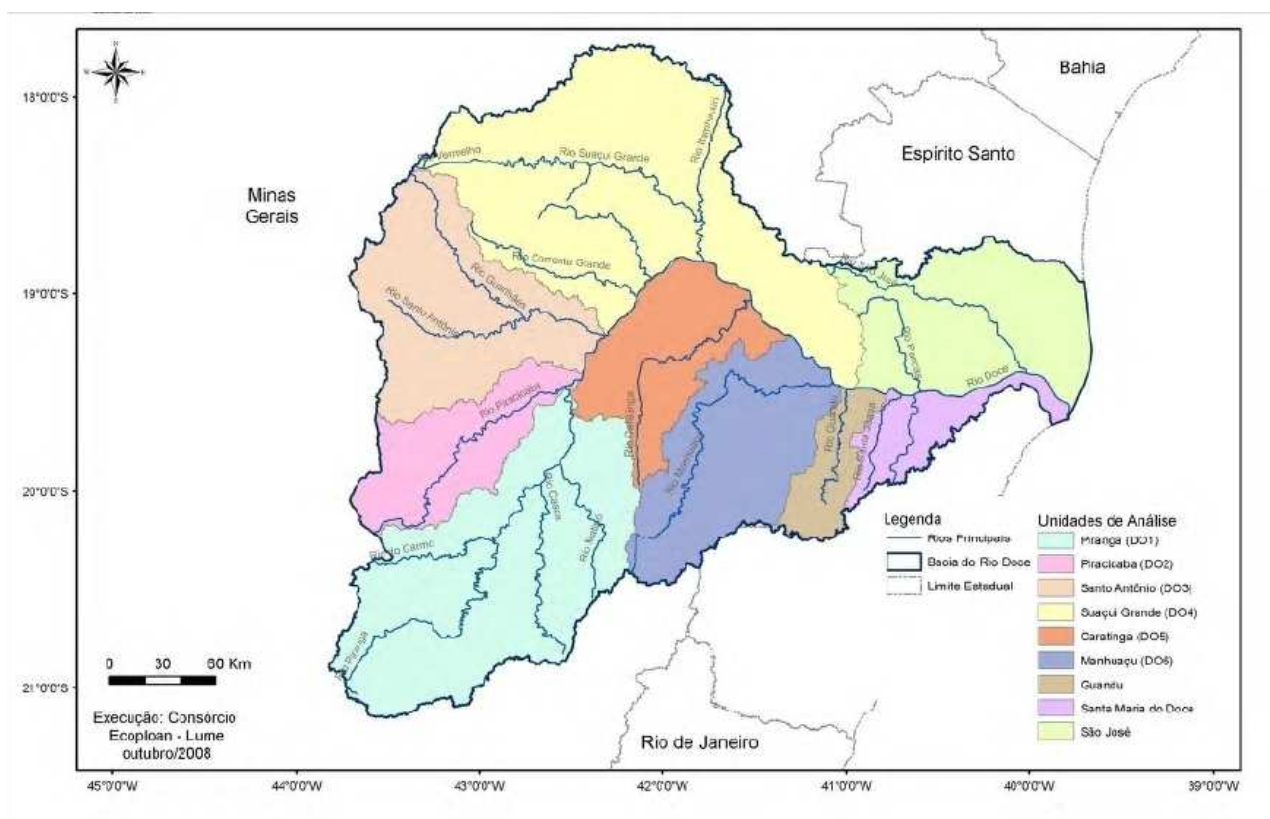


Figura 1 - Localização e unidades de análise (sub-bacias) da Bacia do rio Doce. Os municípios de Ipatinga e Governador Valadares são duas maiores cidades localizadas na bacia do rio Doce. Fonte: IGAM (2010).

As Nascentes do rio Doce situam-se nas serras da Mantiqueira e Espinhaço (MG) onde percorrem 850 km até o deságüe no oceano Atlântico, junto ao povoado de Regência (ES).

No Estado de Minas Gerais, a bacia do rio Doce é subdividida em seis Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs), as quais correspondem ao Comitê da Bacia do Rio Piranga (DO1); ao Comitê da Bacia do Rio Piracicaba (DO2); ao Comitê da Bacia do

Rio Santo Antônio (DO3); ao Comitê da Bacia do Rio Suaçuí Grande (DO4); ao Comitê da Bacia do Rio Caratinga (DO5); e ao Comitê da Bacia do Rio Manhuaçu (DO6). Já na parte da bacia situada no Espírito Santo, não existem subdivisões administrativas, entretanto têm-se os Comitês da Bacia do Rio Guandu, do Rio Santa Maria do Doce e do Rio São José (Figura 1).

A bacia tem uma população superior a 3,5 milhões de habitantes. O Vale do Aço tem o maior adensamento populacional da bacia e constata-se a existência de um fluxo migratório que se direciona, sobretudo, para as maiores cidades, como Ipatinga e Governador Valadares. Em decorrência, há uma tendência de diminuição populacional nos municípios com população de até 20.000 habitantes, que representam mais de 85% dos municípios da bacia do rio Doce.

A população urbana representa mais de 70% da população total (Figura 2). Entretanto, os mesmos dados mostram que mais de 100 municípios possui população rural maior que a urbana, evidenciando que a população rural ainda é significativa, absorvidos pela exploração agropecuária. No Médio Doce, essas atividades constituem o principal gerador de renda, emprego e ocupação de mão-de-obra em municípios de menor porte, principalmente onde a população rural predomina.

A urbanização da bacia também contribui significativamente para os impactos nos cursos d'água, principalmente pelo quase inexistente sistema de tratamento de esgotos.

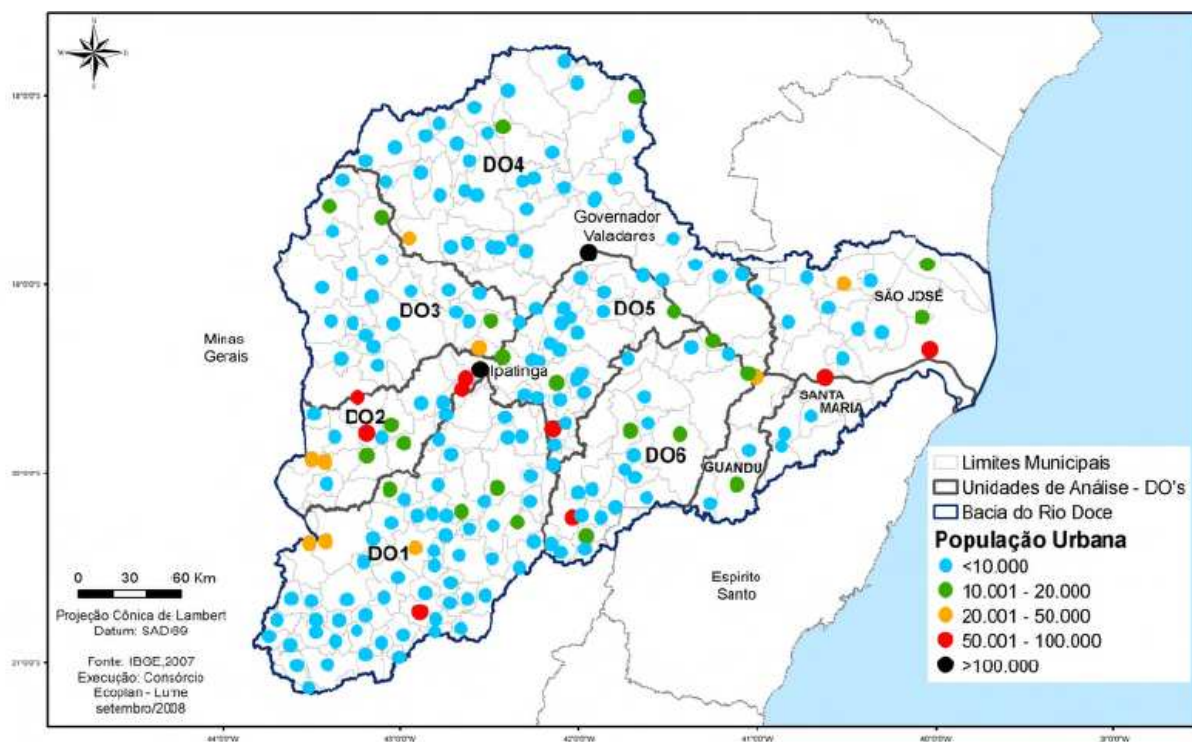


Figura 2 - População urbana dos municípios da bacia do rio Doce. (Fonte: IGAM, 2010).

Descrição do modelo

O modelo hidrológico, denominado IPH-SISDEC, constitui-se num sistema de suporte à decisão para gerenciamento de bacias hidrográficas, que inclui em suas rotinas modelos hidrológicos simples de determinação de quantidade (Pessoa, 2010) e qualidade da água. Todas as ferramentas de análise utilizadas foram programadas através dos componentes do ArcObjects que usa a linguagem Visual Basic for Applications (VBA) no ambiente ArcGIS.

Pré-processamento e dados de entrada

(a) Pré-Processamento

A primeira etapa para utilização do modelo consiste na discretização do domínio. Esta etapa foi realizada no ArcMap™ 9.2 utilizando o pacote hidrológico ArcHydro (Maidment, 2002). O ArcHydro pode ser entendido tanto como um conjunto de ferramentas como uma estrutura de dados projetada para armazenar e relacionar entre si conjuntos de dados geográficos utilizados na área de recursos hídricos. A estrutura de dados ArcHydro é definida utilizando classes de objetos, em que os objetos de uma dada classe possuem propriedades ou atributos em comum, e objetos de classes diferentes podem ser relacionados através de atributos em comum (Whiteaker *et al.*, 2006). Esta estrutura de dados é utilizada para automatizar os processos de extração de informação e preparação de dados para modelagem em diversos modelos hidrológicos (HEC, SWAT, MGB-IPH).

A partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), no ArcHydro, são obtidas informações como direções de escoamento; área de drenagem; rede de drenagem; definição de trechos de rios; e definição de bacias hidrográficas (Figura 3). Como resultado, a bacia hidrográfica do rio Doce foi dividida em 4.355 minibacias, onde cada minibacia tem um trecho de rio associado. Desta forma, informações fisiográficas foram obtidas tais como área de drenagem a montante, comprimento do trecho de rio e declividade do trecho para cada trecho de rio.

(b) Vazão de referência por trecho de rio

A etapa seguinte consistiu na definição das vazões características do período de estiagem por trecho de rio. Admitiu-se a vazão de referência Q_{05} como sendo o volume disponível representativo do período de estiagem para diluição dos efluentes. Vazões de referência específicas ($L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$) foram estabelecidas para cada unidade de análise (sub-bacia), apresentadas na Tabela 1, utilizando as séries de vazões de 187 estações fluviométricas localizadas na da bacia do rio Doce (Figura 4).

Assim, para cada trecho de rio, a disponibilidade hídrica foi calculada multiplicando a área de drenagem da bacia a montante do trecho pela vazão específica de cada sub-bacia.

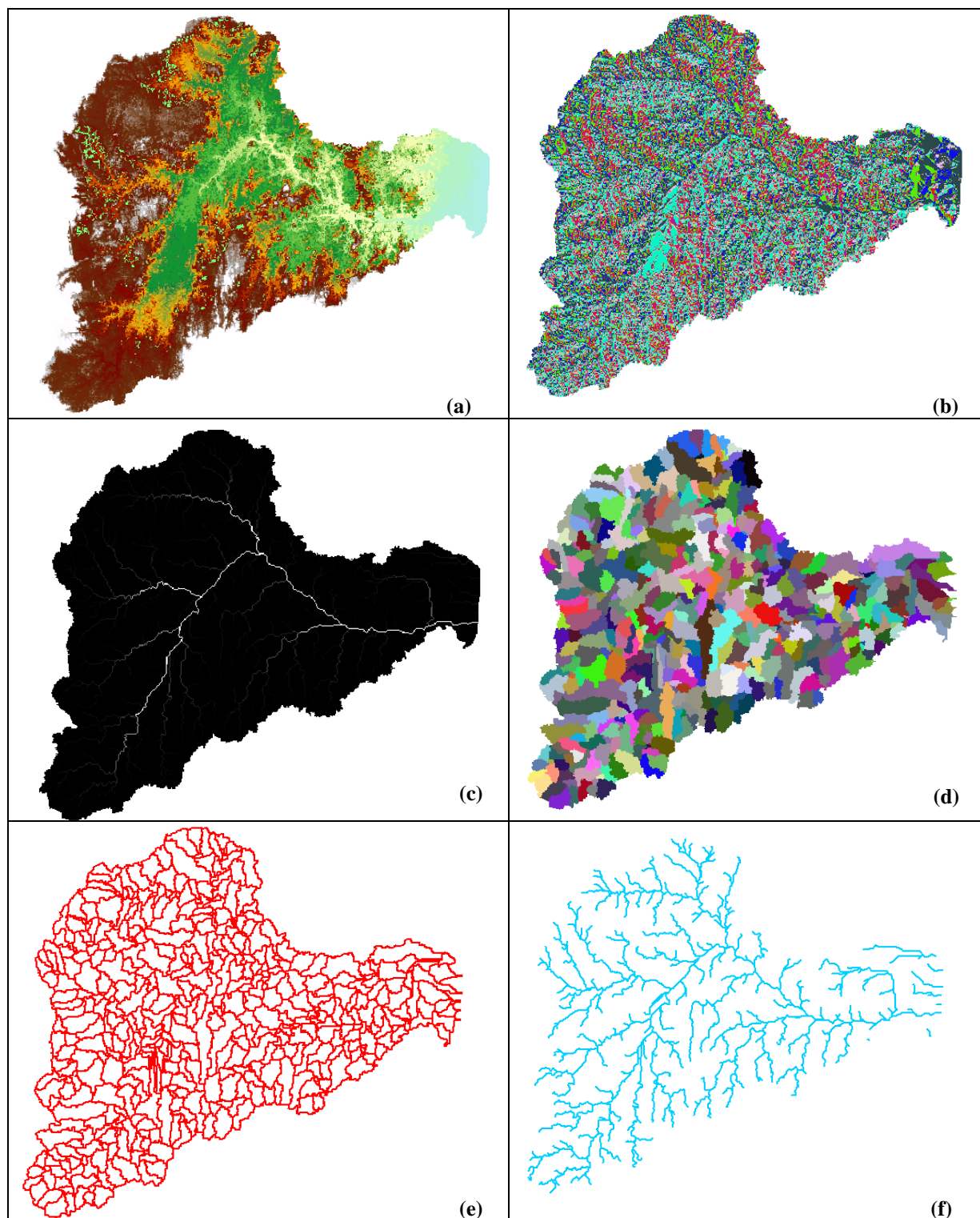


Figura 3 - Etapas da geração da rede de drenagem para bacia do rio Doce. (a) obtenção do MDE; (b) Elaboração das direções de fluxo; (c) Segmentação dos trechos; (d) Obtenção das minibacias; (e) Obtenção dos polígonos das minibacias, e (f) Elaboração das linhas de drenagem.

Tabela 1 – Vazões de Referência em cada sub-bacia da bacia do rio Doce.

Sub-bacia	Área de drenagem	Área	vazão específica		vazão	
			(L/s/km ²)		(m ³ /s)	
	(km ²)	(%)	Q _{MLT}	q ₉₅	Q _{MLT}	Q ₉₅
rio Piranga	6616	0.08	16.3	6.61	108	43.7
rio do Carmo	2265	0.027	22.2	11.2	50.3	25.4
rio Casca	2511	0.03	13.1	5.01	32.8	12.6
rio Matipó	2581	0.031	14.2	4.57	36.8	11.8
rio Piracicaba	5444	0.066	18	6.84	97.9	37.3
rio Santo Antônio	10442	0.126	16.9	6.26	176.3	65.4
rio Corrente Grande	2480	0.03	13.8	5.07	34.1	12.6
rio Suaçuí Pequeno	1721	0.021	10	4.1	17.2	7.05
rio Suaçuí Grande	12432	0.15	8.32	2.34	103.4	29.1
rio Caratinga	3227	0.039	9.81	2.62	31.7	8.47
rio Manhuaçu	8826	0.107	11.2	3.68	98.7	32.5
rio Guandu	2125	0.026	10.4	3.38	22	7.18
rio Santa Joana	906	0.011	8.74	1.58	7.91	1.43
rio Pancas	1180	0.014	12	1.56	14.1	1.84
rio São José	2366	0.029	14.2	2.47	33.7	5.84
Bacia incremental*	17633	0.213	13.3	5.2	581.2	218.6
BACIA do RIO DOCE	82755	1	11.5	3.76	950.4	311.3
rio Barra Seca	3960	-	11.48	3.76	45.5	14.9
Bacia incremental - 1	1863	0.023	14	6.44	222.5	102
Bacia incremental - 2	2924	0.035	14.6	5.96	352.7	144.2
Bacia incremental - 3	981	0.012	14.7	5.8	583.7	231.2
Bacia incremental - 4	3165	0.038	13.2	5.23	728.9	290.1
Bacia incremental - 5	2748	0.033	11.9	4.22	728.7	259.1
Bacia incremental - 6	2543	0.031	11.5	3.76	870.5	285.1

* A bacia incremental foi subdividida em 6 frações: (1) Cachoeira dos óculos – montante; (2) Cenibra; (3) Governador Valadares; (4) Tumiritinga; (5) Resplendor – jusante; (6) Colatina.

Tabela 2 - Valores de carga *per capita* das variáveis de qualidade da água (Fonte: von SPERLING, 1997).

Parâmetro	Unidade	Faixa	Típico	Adotado
DBO ₅	g.hab ⁻¹ d ⁻¹	40 - 60	50	54
Fósforo Total	g.hab ⁻¹ d ⁻¹	1,0 - 4,5	2,5	3,0
Coliformes Termotolerantes	org.hab ⁻¹ d ⁻¹	10 ⁸ -10 ¹¹	10 ⁹	10 ¹⁰

(d) Utilizando a interface do Modelo

Cada usuário (sede municipal) foi cadastrado especificando o nome da sede, a vazão efluente, temperatura da água efluente (considerada 20°) e as concentrações dos poluentes analisados (DBO, Fósforo Total e Coliformes Termotolerantes). O trecho de rio ao qual o usuário está ligado é definido com uma seleção direta utilizando o *mouse* (Figura 5).

A programação no VBA também é responsável pelas operações de propagação, diluição e atualização das concentrações nas colunas correspondentes situadas na tabela de atributos. Além disso, a interface disponibiliza os resultados em forma de mapas de concentrações (classificados de acordo com a Resolução CONAMA n° 357) e gráficos (perfis longitudinais de concentrações) para visualização e melhor interpretação destes resultados por parte do usuário.

Propriedades do trecho	
Número do elemento:	22532
Temperatura (°C):	18.81
Coliformes (org/100mL):	7166897.7
Vazão de referência (m³/s):	213
Classe de enquadramento:	classe 2
DBO (mg/L):	387.11
Fósforo (mg/L):	21.5
Vazão indisponível (m³/s):	8869366.03

Lançamento	
Nome do usuário =	Ipatinga
Nº do processo =	

Localização - UTM (m)	
Coord. X =	1390374
Coord. Y =	7826048

Dados do efluente				
Vazão (m³/h)	Temperatura (°C)	DBO5,20 (mg/L)	Coliformes (org/100mL)	P total (mg/L)
887.48	20	86.38	79980	16.80

Buttons: Confirma, Inserir dados

Figura 5 - Interface do Modelo: Inserção de usuário (sede municipal).

Módulo de qualidade da água

O módulo de qualidade da água foi baseado no modelo QUAL2E (Brown & Barnwell, 1987), o qual estabelece que a variação da concentração do poluente remanescente (P) em um intervalo de tempo (dt) é igual a concentração do poluente multiplicada por uma constante de decaimento (K), podendo ser escrita como:

$$\frac{dP}{dt} = -K \cdot P \quad (1)$$

A equação diferencial tem solução analítica, considerando a variação da concentração do espaço e regime permanente, dada por:

$$P_{i+1} = P_i \cdot \exp\left(\frac{-K \cdot L_i}{U_i}\right) \quad (2)$$

onde P_i e P_{i+1} são as concentrações do poluente nos trechos i (montante) e $i+1$ (jusante), respectivamente; L_i é o comprimento em metros do trecho de rio i e U_i é a velocidade média, em $m.s^{-1}$, no trecho i . A velocidade média foi estimada pela seguinte relação:

$$U_{i+1} = \frac{Q_i}{A_i} \quad (3)$$

onde Q_i é a vazão em $m^3.s^{-1}$ e A_i é a área da seção transversal em m^2 . A área da seção transversal em cada trecho foi estimada através de uma relação potencial com a área de drenagem. Esta relação foi construída a partir dos dados de área da seção transversal encontrados nas estações fluviométricas.

A diluição das concentrações também é considerada no processo de propagação e depende da vazão do trecho. A concentração do poluente ao final do processo de diluição no trecho de rio é dada por:

$$P_{i+1}^{t+1} = \frac{P_i^t Q_i + P_{i+1}^t Q_{i+1}}{Q_i + Q_{i+1}} \quad (4)$$

Calibração do modelo

O modelo de qualidade da água em ambiente SIG foi calibrado considerando o cenário atual de disponibilidade hídrica (regime permanente), produção de efluentes e de tratamento de esgoto no período de estiagem.

Existem duas fontes de monitoramento da qualidade da água na bacia do rio Doce: (a) o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM/MG), que monitora regulamente (em média quatro levantamentos por ano, desde 1997) diversos parâmetros de qualidade da água em vários pontos do

lado Mineiro da bacia do rio Doce; e (b) o Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo (IEMA/ES), o qual monitorou entre 2006 e 2007 (três levantamentos por ano) alguns parâmetros de qualidade da água para alguns pontos do lado Capixaba da bacia do rio Doce.

Para a calibração do modelo, foram selecionados 12 pontos de monitoramento ao longo do rio Doce (7 pontos do IGAM e 5 pontos do IEMA). As localizações dos pontos selecionados podem ser observadas na Figura 6. Para a comparação com a saída do modelo apenas os dados observados no período de estiagem foram selecionados, uma vez que o modelo simula a qualidade da água para uma vazão mínima de referência (Q_{95}) e em uma condição de regime permanente.

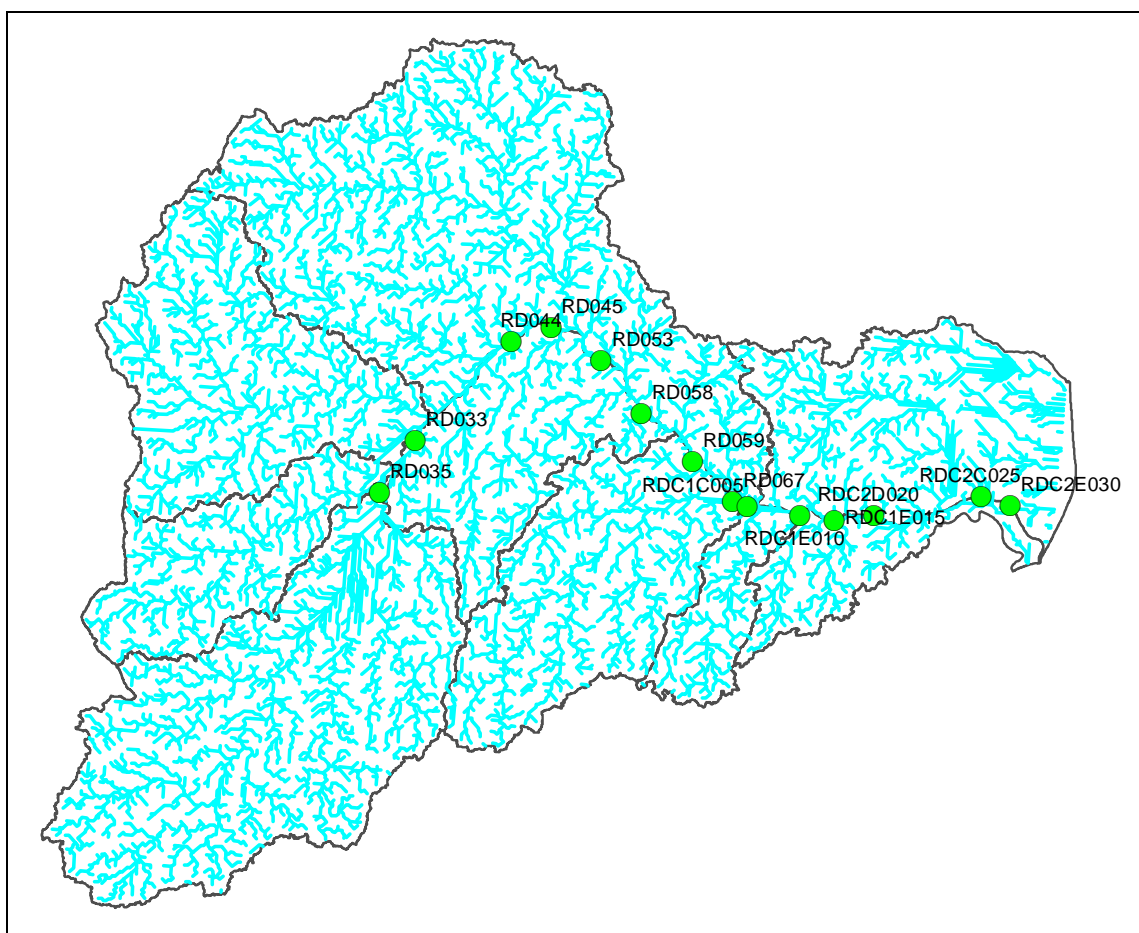


Figura 6 – Localização dos pontos de monitoramento ao longo do rio Doce utilizados para a calibração do modelo hidrológico.

Os valores observados são apresentados como *boxplot* e foram posicionados no gráfico de acordo com a sua localização no rio Doce. O *boxplot* é um elemento gráfico que possibilita representar a distribuição de um conjunto de dados com base em alguns de seus parâmetros descritivos, quais sejam: a mediana, o quartil inferior, o quartil superior e do intervalo interquartil.

Para a calibração do modelo, utilizou-se o seguinte procedimento: primeiramente os valores dos parâmetros do modelo foram predefinidos de acordo com a faixa de variação estabelecida na

literatura (Tucci, 1998); subsequentemente, os parâmetros do modelo foram manualmente e gradativamente alterados até que se atingisse uma correspondência satisfatória entre a saída do modelo e os *boxplots*, os quais representam uma síntese dos dados observados em uma determinada seção transversal na calha do rio Doce.

RESULTADOS

Os resultados da calibração do modelo para as variáveis simuladas estão apresentados na Figura 7. Pode-se observar uma boa correspondência, em termos médios, entre os valores estimados pelo modelo e os *boxplots*, os quais representam um resumo estatístico dos dados observados. O modelo representou razoavelmente a redução das concentrações dos poluentes ao longo da extensão do rio Doce (de montante para jusante) em função de dois fatores: (a) efeito de diluição da vazão e (b) decaimento de primeira ordem das concentrações no tempo (esse decaimento foi mais acentuado para Coliformes Termotolerantes).

O modelo conseguiu representar bem os picos de concentração, observados a montante do perfil longitudinal, referentes ao lançamento de efluentes dos dois maiores centros urbanos (Ipatinga e Governador Valadares). Além disto, elevação das concentrações na parte final do rio Doce também foi bem representada. Esta elevação de concentrações ocorreu principalmente devido ao lançamento de efluentes nos municípios de Colatina e Linhares, ambos localizados no Espírito Santo. No entanto, no trecho final do rio Doce o modelo tendeu a superestimar dos valores de Coliformes Termotolerantes, em termos médios.

Os valores dos coeficientes de decaimento (K) encontrados após o processo de calibração para Coliformes Termotolerantes, Fósforo Total e DBO, foram, respectivamente, $0,90 \text{ dia}^{-1}$; $0,12 \text{ dia}^{-1}$; e $0,23 \text{ dia}^{-1}$.

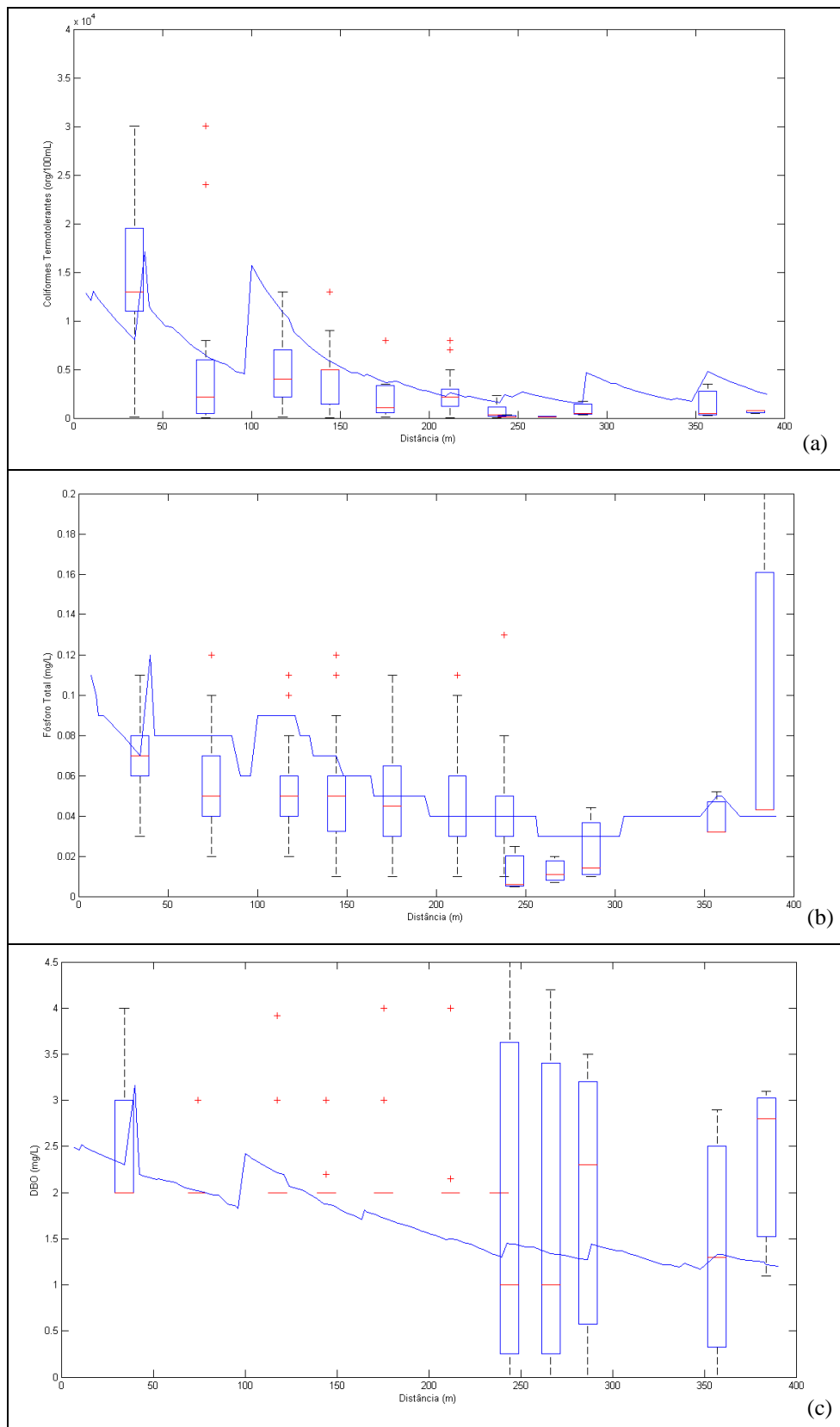


Figura 7 - Comparação das concentrações de Coliformes Termotolerantes (a), Fósforo Total (b) e DBO (c) estimadas pelo modelo (linha contínua) com os dados observados no período de estiagem ao longo da calha do rio Doce (de montante para jusante). Os dados observados são expressos como boxplot e foram posicionados no gráfico de acordo com a sua localização no rio Doce.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O modelo hidrológico integrado a um SIG foi útil para avaliar as consequências de vários fatores na qualidade da água da bacia do rio Doce, tais como a pouca disponibilidade da água para diluição de efluentes, o lançamento de fontes pontuais de poluição e reações cinéticas.

Apesar da disponibilidade de grande quantidade de modelos de qualidade da água aplicados a rios, as aplicações e interpretação dos resultados da maioria destes modelos são limitadas pela dificuldade de uso e manuseio por parte dos usuários (Rauch *et al.*, 1998). A estratégia de integração de modelos hidrológicos em ambiente SIG permite oferecer um ambiente interativo para o usuário, facilitando no processo de tomada de decisão para planejamento da qualidade da água em rios (Srinivasan & Arnold, 1994). Esta abordagem integrada também pode ser replicada e facilmente empregada em outras bacias hidrográficas.

A estrutura do modelo apresentado consiste em uma simples abordagem matemática para representação do escoamento e simulação dos parâmetros de qualidade da água no período de estiagem. Esta estrutura resultou em apenas um parâmetro por poluente, o que reduziu a complexidade e facilitou o processo de calibração. Apesar das limitações na estrutura do modelo hidrológico, a calibração indicou uma capacidade satisfatória de representação das concentrações dos poluentes ao longo da extensão do rio Doce, sugerindo que a estrutura utilizada foi adequada aos propósitos do estudo.

As taxas de decaimento dos poluentes podem variar ao longo do rio (de montante para jusante), de modo que trechos mais turbulentos promovem maior oxigenação da coluna d'água e maior degradação da matéria orgânica (Streeter *et al.*, 1936). Neste estudo, como simplificação, esta heterogeneidade espacial dos parâmetros não foi considerada. Com relação aos parâmetros do modelo, verificou-se uma baixa quantidade de análises dos parâmetros de qualidade da água nos pontos de monitoramento localizados no trecho Capixaba do rio Doce. Como o tamanho da amostra pode influenciar consideravelmente o cálculo das estatísticas nos *boxplot* (Haan, 1977), a estimativa do modelo, neste trecho, deve ser interpretada com cautela. Outra limitação se refere aos dados medidos de DBO no trecho mineiro. Observou-se uma uniformidade dos valores em torno de 2 mg.L⁻¹, que pode ser uma limitação das análises em laboratório, mas que dificilmente aconteceria na prática.

Com isto, os resultados obtidos na calibração do modelo demonstraram que este tipo de modelagem hidrológica de qualidade da água integrada a um SIG constitui de importante ferramenta

em que pode preencher consideráveis lacunas no conhecimento e subsidiar o processo decisório no planejamento de recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a disponibilização dos dados utilizados na elaboração do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do rio Doce desenvolvido pela ECOPLAN Engenharia sob a coordenação do Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM), em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Estadual de Meio Ambiente do Espírito Santo (IEMA).

BIBLIOGRAFIA

CHAPRA, S.C. (1997). *“Surface water-quality modeling”*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 844 pp.

CORREIA, F. N., REGO, F. C.; SARAIVA, M. G.; RAMOS, I. (1998). *“Coupling GIS with hydro-logic and hydraulic flood modeling”*. Water Resources Management, 12: 229–49.

FOTHERINGHAM, A. S., & ROGERSON, P. A. (Eds.). (1994). *“Spatial analysis and GIS”*. London: Taylor & Francis.

GASTALDINI, C.C.M.; TEIXEIRA, C. E. (2003). *“Avaliação da Qualidade da Água”*. In: Paiva, D. B. J. & Paiva, D.C.M.E. (eds) Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas.

GOODCHILD, M. F., HAINING, R., & WISE, S. (1992). *“Integrating GIS and spatial data analysis: Problems and possibilities”*. International Journal of Geographical Information Systems, 6, 407±423.

HAAN, C.T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 378 p.

HEC - Hydrological Modeling System. (2001). *User's Manual*. US Army Corps of Engineers. 188p.

LEE, M.T.; WHITE, D.C. (1992). *“Applications of GIS databases and water quality modeling for agricultural nonpoint source pollution control”*. Water Resources Center, University of Illinois, Research Report No. 214.

MAIDMENT D. R. (2002). *“Arc Hydro: GIS for Water Resources”*. Redlands, CA, ESRI Press.

MGB-IPH. (2009). *“Manual Arc-Hydro para aplicação do modelo MGB-IPH”*. Versão 1.2. Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. FINEP/ANA/IPH-UFRGS. 87p.

NOVOTNY, V.; CHESTERS, G. (1989). *“Delivery of Sediment and Pollutants from Nonpoint Sources: A Water Quality Perspective”*. Journal of Soil and Water Conservation 44(6):568-576.

PESSOA, M.M.E.P. (2010). *“Integração de Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica na análise de processos de Outorga Quantitativa de uso da água: Aplicação na Bacia do Rio dos Sinos – RS”*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 90p.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão de Águas (2010). *“Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do rio Doce”*. Acessado em janeiro/2011: <http://www.pirhdoce.com.br/downloads>.

RAUCH, W., HENZE, M., KONCSOS, L. REICHERT, P., SHANAHAN, P., SOMLYODY, L.; VANROLLEGHEM, P. (1998). *“River water quality modelling: I. State of the art”*. IAWQ Biennial Int. Conf. Vancouver-Canada, 21-26.

ROSE, C.W.; DICKINSON, W.T.; GHADIRI, H.; JØRGENSEN, S.E. 1990. *“Agricultural Non-point Source Runoff and Sediment Yield Water Quality (NPSWQ) Models - User's Perspective”*. In Proceedings of International Symposium on Water Modeling of Agricultural Nonpoint Sources. USDA, Agricultural Research Service ARS-81, pp. 145-169.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G. (1994). *“Integration of the basin-scale water quality model with GIS”*. Water Resources Bulletin. v. 30 (3): 453-462.

STREETER, H.W.; WRIGHT, C.T.; KEHR, R.W. (1936). *“Measures of natural oxidation in polluted streams. III. An experimental study of atmospheric reaeration under stream-flow conditions”*. Sewage Works Journal. Vol. 8, No. 2 (Mar., 1936), pp. 282-316

SUI, D.; MAGGIO, R. (1999) *“Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems and prospects”*. Computers, Environment and Urban Systems. v. 23, 33-51.

SWAT - Soil and Water Assessment Tool. (2000). *User's Manual*. S.L. NEITSCH; J.G. ARNOLD; J.R. KINIRY; J.R. WILLIAMS. Acesso em janeiro/2011: <http://www.brc.tamus.edu/swat/doc.html>.

TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. – Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH.

VON SPERLING, M. (1997). *Princípios do tratamento Biológico de Águas Residuárias, Lodos ativados*, Volume 4, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, P. 253-268.

WHITEAKER, T. L.; MAIDMENT, D. R.; GOODALL J. L.; TAKAMATSU M. (2006). “*Integrating Arc Hydro Features with a Schematic Network*”. *Transactions in GIS* 10(2): 219–237