

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

USO DA MODELAGEM DINÂMICA EM BACIA HIDROGRÁFICA: avaliação do componente fósforo no Rio das Mortes, MG

Aluizio Durço Bernardino ¹, *Mauri Fortes* ², *Wanyr Romero Ferreira* ³

Resumo – A preocupação global com a qualidade dos recursos hídricos tem aumentado nas últimas décadas, levando muitos países a estabelecer uma legislação específica sobre a gestão dos recursos hídricos. Este trabalho está relacionado à modelagem e avaliação da poluição por metais em bacias hidrográficas. Seu objetivo é apresentar uma discussão baseada em dados da literatura experimental e resultados simulados sobre o fluxo de água e concentração de poluentes nos pontos de monitoramento da qualidade da água na Bacia do Rio das Mortes, afluente do Rio Grande. As técnicas de dinâmica de sistemas permitiram a modelagem e simulação, no ambiente do software Stella, dos efeitos poluentes devido ao fósforo. Os resultados mostram que a concentração desse poluente é frequentemente superior à máxima permitida pela legislação para rios da classe 2. Os resultados indicam, também, a necessidade de regras diferentes das existentes, uma vez que estas não permitem avaliar efetivamente o nível de poluição desejado.

Palavras-Chave – poluição hídrica; comportamento de poluentes; impacto ambiental.

Abstract – Global concern about the quality of water resources has increased in recent decades, triggering many countries to establish specific legislation on water resources management. This work is related to modeling and assessing metal pollution in river basins. Its objective is to present discussion based on experimental literature data and associated simulated results on water flow rate and pollutant concentration at the monitoring points of water quality in Rio das Mortes' Basin, a tributary of Rio Grande. The techniques of system dynamics allowed modeling and simulating, in the Stella software environment, the polluting effects due to phosphorus. The results show that the concentration of that pollutant is frequently above the legislation allowed maximum for class 2 streams. The results indicate a need for guidelines different the existing ones, since these last do not show how to effectively establish the desired pollution level.

Key-words – water pollution; behavior of pollutants, environmental impact

INTRODUÇÃO

O aumento da contaminação dos recursos hídricos em todo o mundo por inúmeros compostos químicos industriais e naturais é um dos principais problemas ambientais que a humanidade enfrenta (MALMQVIST e RUNDLE, 2002). Estes compostos, em muitos casos, estão presentes em baixas concentrações, mas alguns deles devem ser considerados importantes pela sua concentração e capacidade toxicológica (SCHWARZENBACH *et al.*, 2006). Sistemas de monitoramento de concentrações de poluentes, nutrientes e compostos tóxicos têm indicado aumento contínuo destes compostos, principalmente de nutrientes como o nitrato (DEVLIN e BRODIE, 2005; PALMER e

¹ Mestre em Turismo e Meio Ambiente, professor do Centro Universitário UNA, Rua Goitacazes, 1159, bairro Barro Preto, Belo Horizonte – MG, Brasil, CEP:30190-051, (31) 88945369, aluizio.bernardino@prof.una.br

² PPhD em Engenharia de Produção Agroindustrial, professor do Centro Universitário UNA, Rua Aimorés, 1451, bairro Lourdes, Belo Horizonte – MG, Brasil, CEP: 30430-260, (31) 99908202, mauri.fortes@terra.com.br

³ Doutora em Energia pela Université Paul Sabatier, professora do Centro Universitário UNA, Rua Aimorés, 1451, bairro Lourdes, Belo Horizonte – MG, Brasil, CEP:30430-260, (31) 99774546, wanyr@terra.com.br

ALLAN, 2006). Em muitos países industrializados, onde há definição de prioridades para melhorar a qualidade e a condição ecológica das águas tem ocorrido diminuição de lançamento de poluentes nos cursos de água (MALMQVIST e RUNDLE, 2002). No Brasil, assumir a relevância da água como um bem natural, de interesse econômico e estratégico, é de extrema importância para todos os países, principalmente para o Brasil que possui aproximadamente 14% da disponibilidade mundial de água doce (LANNA, 2008).

A modelagem matemática é uma importante ferramenta usada no estudo de transporte de poluentes e de uso de águas superficiais (RECKHOW, 1994). Há vários modelos para análise dos efeitos da eutrofização, ecotoxicidade, dinâmica de materiais tóxicos, sedimentação e remineralização, bioacumulação e outras análises, tais como o AQUATOX, CASM, QUAL2K, WASP, GBMB, BASS entre outros (PARK *et al.*, 2008).

A elaboração de modelos que permitam prever o nível de contaminação existente nos organismos em relação ao tempo pode ser conceitualmente complexa (MONTE, 2002). Os modelos citados por Park *et al.* (2008) utilizam parâmetros que em algumas bacias hidrográficas ainda não foram estudados. Assim, torna-se importante avaliar o comportamento dos compostos poluentes analisados pelo Índice de Qualidade da Água (IQA) de um curso de água, de maneira a projetar condições futuras de aumento e redução da carga poluidora.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo para avaliar a variação da concentração do componente fósforo na Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes (BHRM), na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos GD2 (UPGRH GD2), baseado nos princípios de dinâmica de sistemas, a partir dos dados referentes aos parâmetros de monitoramento da qualidade da água.

REFERENCIAL TEÓRICO

Os recursos hídricos superficiais estão dispostos em cursos d'água que têm sua origem dentro de bacias hidrográficas, que segundo Mazzini (2008, p.109) é uma “área geográfica, delimitada por divisores de água – normalmente constituídos por montanhas ou outras elevações – drenada por um rio e seus afluentes”. Sendo assim as cidades brasileiras estão inseridas em Bacias Hidrográficas conforme a Lei federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997). Em alguns casos, o território do município está em duas ou mais bacias ou sub-bacias.

No Brasil, todos os corpos de água têm usos múltiplos previstos na Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, no estado de Minas Gerais pela Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999 (BRASIL, 1997; MINAS GERAIS, 1999). O Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-MG) sancionaram a Deliberação Normativa Conjunta (DNC) COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de Maio de 2008, dispondo sobre a classificação

dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, também estabelecendo as condições e padrões de lançamento de efluentes, baseada na Resolução CONAMA nº 357, de 17 de Março de 2005 (BRASIL, 2005; MINAS GERAIS, 2008a).

Conforme Toledo e Nicolella (2002) e Tucci *et al.* (2007), existem várias técnicas para elaborar um IQA, tais como a de Liebmann, Harkins, bioindicadores, mas a técnica mais usada é a que foi desenvolvida pela National Sanitation Foundation Institution (NSFI) dos EUA, que é usada em Minas Gerais. O IQA desenvolvido pela NSFI utiliza parâmetros que representam as características físico-químicas e biológicas, para indicar o nível de qualidade em que se encontra um corpo hídrico, sendo que a presença de poluição pode ser percebida quando estas características ocorrem acima dos parâmetros estabelecidos (IGAM, 2005).

Conforme Vasconcelos *et al.* (2009), dependendo dos parâmetros utilizados para calcular o IQA, este se torna um indicador para análise apenas do ponto de vista sanitário, sendo influenciado pela quantidade e qualidade dos esgotos sanitários lançados nos cursos de água. Para uma avaliação mais completa das condições ambientais dos recursos hídricos, outros parâmetros devem ser utilizados, tais como metais, poluentes orgânicos, ecotoxicidade entre outros.

De acordo com Jørgensen e Bendoricchio (2001), a maioria dos problemas em ciências ambientais e ecologia pode ser representada por um modelo dinâmico, uma vez que esses modelos utilizam equações diferenciais e de diferença e outras técnicas matemáticas que permitem descrever a resposta do sistema aos fatores externos. Angelini (1999) utilizou dois modelos para quantificar ecossistemas. Um desses, o modelo ELLOBO, desenvolvido no STELLA, que é um programa de simulação dinâmica de sistemas, foi preparado para trabalhar com três variáveis de estado: biomassas de fitoplâncton, zooplâncton e quantidade de lambaris em um sistema produtor-presa-predador. Nele simulam-se as relações existentes entre o crescimento e morte das variáveis de estado estipuladas.

Voinov *et al.* (1999a) desenvolveram o Patuxent Landscape Model (PLM) para “simular os processos ecológicos fundamentais na escala de bacias hidrográficas, em interação com um componente econômico que prevê os padrões de uso da terra”. Este modelo utiliza as equações geradas a partir do STELLA para centrar-se na componente ecológica do PLM. Em outro estudo, Voinov *et al.* (1999b) desenvolveram um sistema para modelagem regional, especificamente para bacias hidrológicas, que permitia a integração entre a vegetação, nutrientes e elementos do modelo socioeconômico. O modelo foi aplicado à Bacia Hidrográfica de Patuxent, Maryland, EUA. Os resultados mostraram-se satisfatórios em relação a modelos hidrológicos mais complexos.

Também utilizaram o STELLA Sánchez-Román *et al.* (2009) e Souza *et al.* (2010) para avaliar, respectivamente, os Modelos de Gestão de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, e da Bacia Hidrográfica do Rio Preto, em seus aspectos de

inter-relações entre mudanças das classes de uso do solo, fatores climáticos e os ecossistemas aquáticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A UPGRH GD2 é uma unidade de planejamento composta por três bacias hidrográficas dos rios do Cervo, Jacaré e das Mortes. Apenas esta última possui um conjunto de estações de monitoramento da qualidade da água e medição de vazão com dados distribuídos em um espaço temporal maior. Assim, este estudo utilizou-se dos dados disponíveis na literatura sobre os valores espaciais e temporais do IQA e vazão na área da Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes (BHRM) no estado de Minas Gerais. Os pontos de medição dos valores de vazão não coincidem com os pontos de monitoramento da qualidade da água na bacia, no período de estudo. Os valores das distâncias entre os pontos de monitoramento foram medidos por meio do programa Google Earth (2010).

Assim, foram utilizados os dados de:

- ✓ Vazões do Rio das Mortes medidas nas estações fluviométricas controladas pela ANA – HIDROWEB – (2010b) e localizadas nas proximidades dos pontos de monitoramento de qualidade da água, entre os anos de:
 - 1961 e 1965 para o BG011, na estação 61088000;
 - 1998 e 2002 para BG012, BG013 e BG015, nas estações 610850000, 61090000, 6107000 respectivamente;
 - 1978 e 1982 para BG014, na estação 61089998;
 - 1999 e 2003 para BG017, na estação 61135000; e
 - 2002 para BG010 fornecida pelo IGAM (2003a).
- ✓ Concentração de poluentes encontrada no relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais em 2000, fornecido por FEAM & IGAM (2001).
- ✓ Concentração de poluentes encontrada nos relatórios de qualidade da água fornecidos pelo IGAM entre os anos de 2001 e 2009 (IGAM, 2002, 2003b, 2004, 2005, 2006, 2008 a, b, 2010).

O uso dos dados de vazão do Rio das Mortes em diferentes períodos deve-se ao fato da inexistência de um levantamento contínuo destas informações; assim, por não ser possível coincidir os períodos de análise da qualidade da água com o monitoramento da vazão do Rio das Mortes, utilizaram-se os valores médios mensais das vazões existentes em um intervalo de tempo entre 1 e 5 anos de monitoramento contínuo.

Cumprir citar que nos estudos realizados pela Fundação Rural Mineira (2005) e pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC (1988), sobre a BHRM, caracteriza-se esta bacia como uma região homogênea para a precipitação média anual, com variação entre 1285 e 1420 mm/ano. O uso dos valores de precipitação e evaporação na bacia foi simplificado visto que as medições das concentrações dos poluentes estão distribuídas em períodos chuvosos e secos.

Nos relatórios de monitoramento da qualidade das águas do Rio Grande, de 2007 a 2009, há alguns parâmetros de monitoramento com valores acima do permitido pela legislação mineira para o enquadramento atual do Rio das Mortes. Dentre os parâmetros do IQA que apresentaram valores acima do permitido, foi escolhido para desenvolver a avaliação da concentração de poluentes no curso do Rio das Mortes o parâmetro Fósforo Total (IGAM, 2008a, b, 2010).

Para realizar os cálculos utilizaram-se os dados de concentração de poluentes obtidos nas campanhas de monitoramento de qualidade da água nos anos de 2000 até 2009, fornecidos pelo IGAM e FEAM. Os poluentes devem apresentar valores máximos condizentes com os valores para rios enquadrados na Classe 2 conforme DNC COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de Maio de 2008, de 100 mg/L (FEAM, IGAM, 2001; IGAM, 2002, 2003b, 2004, 2005, 2006, 2008a, b, 2010; MINAS GERAIS, 2008a).

Para Toledo e Nicolella (2002), as áreas agrícolas e regiões urbanas contribuem para o aumento de carga de fósforo nos recursos hídricos e, conforme Schwarzenbach *et al.* (2006), 60% do fósforo presente nos recursos hídricos é de origem antropogênica. Este elemento em determinadas condições propicia a redução do oxigênio dissolvido, devido às reações de oxidação e consumo, fato limitante para a vida aquática.

O excesso de fósforo total pode vir a causar eutrofização em cursos d'água lênticos, visto que, como um importante nutriente, irá proporcionar o crescimento e desenvolvimento de plantas aquáticas, aumentando a competição entre essas plantas e os animais aquáticos pelo oxigênio dissolvido na água (GONÇALVES *et al.*, 2005; MOREIRA *et al.*, 2010; BITTENCOURT e GOBBI, 2006). Para Mansor (2005) o fósforo pode facilitar o crescimento de cianobactérias, que produzem toxinas que afetam a saúde humana. Segundo Pignatti (2004) a presença de excesso de fósforo em cursos d'água, além de gerar eutrofização e crescimento de bactérias, pode proporcionar condições adequadas para a manutenção e procriação do vibrião da cólera, um causador de danos à saúde humana.

DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Constituição Federal Brasileira (BRASIL, 1988) determina que as bacias hidrográficas em território brasileiro estejam divididas entre as de domínio da União e as que pertencem aos Estados e ao Distrito Federal. Desta forma, a Agência Nacional de Águas – ANA (2010a) define a Região Hidrográfica do Paraná como uma bacia de domínio federal que possui uma área de 879.860km², abrangendo os estados de São Paulo (25% da região), Paraná (21%), Mato Grosso do Sul (20%), Minas Gerais (18%), Goiás (14%), Santa Catarina (1,5%) e Distrito Federal (0,5%). Os 18% pertencentes ao estado de Minas Gerais são representados pelas porções mineiras das Bacias Hidrográficas do Rio Grande e Rio Paranaíba.

A parte mineira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande é subdividida em 8 (oito) Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH). A UPGRH GD2 está localizada entre as coordenadas geográficas 43°30'0" e 45°30'0" de longitude oeste, e 20°40'00" e 21°40'0" de latitude sul. Compreende as bacias hidrográficas dos Rios Jacaré, das Mortes e do Cervo, FIG. 1, localizada na mesorregião do Campo das Vertentes, com uma área de drenagem de 10.547km² e abrange um total de 30 sedes municipais e parcelas territoriais de outros 12 municípios. Nesta área o clima é classificado como semiúmido, de maneira a apresentar por volta de quatro a cinco meses secos por ano, possuindo uma disponibilidade hídrica acima de 20L/s.km² (IGAM, 2009a).

O estudo foi realizado com os dados da BHRM, que abrange uma área de 6.606km², localizada entre as coordenadas geográficas 44°55'0" e 45°5'0" de longitude oeste, e 20°45'00" e 21°30'0" de latitude sul, e, possui estudos de caracterização ambiental desde 1988 (CETEC, 1988). Os dados de qualidade de água da BHRM estão mais consistentes devido ao maior número de pontos de monitoramento e períodos de amostragem a partir de 1997 (IGAM, 2009a).

A BHRM possui como divisor de águas na parte sul, sudeste e leste a serra da Mantiqueira, dividindo as águas da bacia do rio das Mortes e do Paraíba do Sul. Na parte nordeste a serra da Mantiqueira continua como divisor de águas, mas na parte setentrional as águas são drenadas para a Bacia do Rio Doce. Ao norte, o divisor de águas é a serra das Vertentes, que divide as águas da bacia do Rio das Mortes com a do Rio São Francisco, e com a bacia do Rio Jacaré a noroeste (CETEC, 1988).

Os danos ambientais e poluição visível caracterizada por garrafas, baldes, sacolas e esgoto preenchendo a "superfície" do Ribeiro de Santo Antônio, um afluente do Rio das Mortes, podem ser vistos, de forma simples, nas FIG. 2 e 3. Este rio foi apreciado pelas crianças, fonte de pesca e água de qualidade, foi testemunha de conflitos, "guerras", entre outros eventos importantes da história mineira.

Conforme Ab'Sáber (2003, p. 9) "[...] a paisagem é sempre uma herança. Na verdade, ela é uma herança em todo o sentido da palavra: herança de processos fisiográficos e biológicos, e patrimônio coletivo dos povos que historicamente as herdaram como território de atuação de suas comunidades".



Figura 2 – Lixo no Ribeiro de Santo Antônio, próximo a foz com o Rio das Mortes, Tiradentes, MG
Fonte: Acervo Pessoal (Fotógrafa Cida Diniz), 2008



Figura 3 – Ribeiro de Santo Antônio, Tiradentes, MG
Fonte: Acervo Pessoal (Fotógrafa Cida Diniz), 2008

A UPGRH GD2, mostrada na FIG. 4, apresenta os pontos de monitoramento BG010 até BG017 pertencentes à BHRM. O ponto BG019 está localizado no Rio Grande, sendo o quarto ponto de monitoramento desse rio. O BG021 é o único ponto de monitoramento do Rio Jacaré, e o Rio do Cervo não possui pontos de monitoramento de qualidade da água.

Para desenvolver uma modelagem dinâmica que avaliasse o comportamento de poluentes existentes na BHRM, foram utilizados os dados dos pontos de monitoramento BG010, BG011, BG012, BG013, BG014, BG015 e BG017 distribuídos na área de estudo conforme a FIG.4.

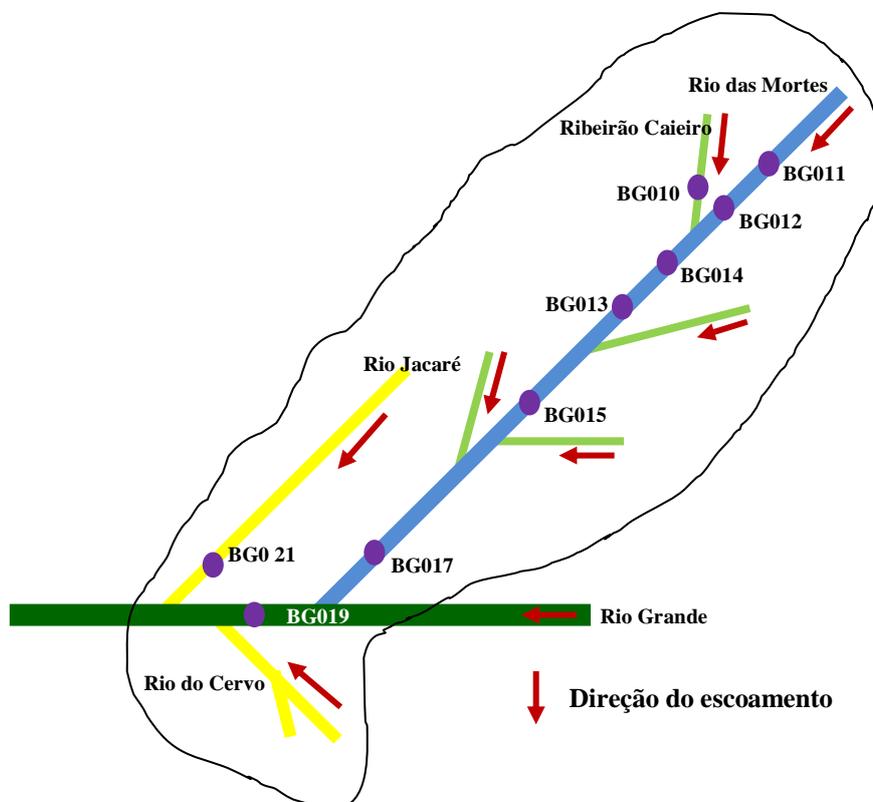


Figura 4 – Modelo esquemático dos Pontos de monitoramento na UPRGH GD2.

Para efetuar uma análise ambiental de um rio é necessário calcular a vazão mássica (carga) e a taxa de aporte ou degradação dos poluentes entre os pontos de monitoramento. No estado de Minas Gerais os resultados obtidos devem estar dentro dos limites de enquadramento estabelecido legalmente, pela DNC COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de Maio de 2008 (MINAS GERAIS, 2008a).

Utilizou-se o software STELLA para desenvolver o modelo em que os elementos de vazão e concentração de poluentes interconectam-se para explicar a dinâmica do comportamento da carga poluente ao longo das estações de monitoramento. A FIG. 5 representa o diagrama de modelagem da concentração de poluentes em um rio.

Considerou-se que as concentrações dos poluentes escolhidos fossem homogêneas nos pontos de monitoramento devido aos movimentos turbulentos existentes no meio lótico. Desta forma os valores de concentração representam todo o material adicionado ao curso de água por fontes pontuais e difusas a montante dos pontos de monitoramento.

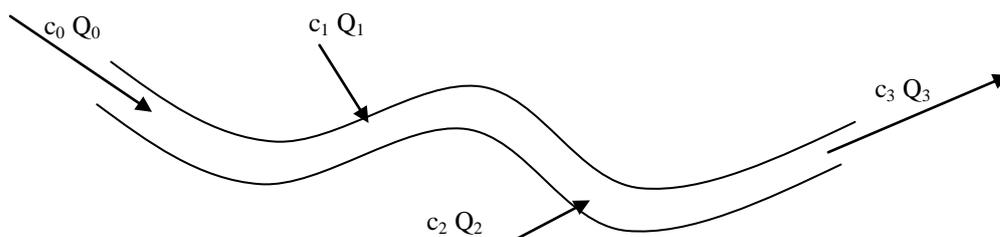


Figura 5 – Diagrama de modelagem para a concentração de poluentes em um rio.

Em um ponto de monitoramento a vazão mássica (\dot{m}_{pol}) de um poluente pode ser dada por

$$\dot{m}_{pol} = c_p \times Q \quad (1)$$

Em que c_p = concentração de poluente no ponto de monitoramento (g/m^3) e Q = vazão volumétrica no ponto de monitoramento (m^3/dia).

TESTES DE SENSIBILIDADE

Foram realizados três testes de sensibilidade para as alterações na concentração do poluente Fósforo Total:

- ✓ Teste A – alteração dos valores da concentração apenas do ponto de monitoramento BG011.
- ✓ Teste B – alteração dos valores da concentração apenas do ponto de monitoramento BG010.
- ✓ Teste C – alteração dos valores da concentração nos pontos de monitoramento BG010 e 11.
- ✓ Cada teste originou quatro subdivisões:
 - ✓ Testes A0, B0 e C0 – sem alteração do valor de concentração;
 - ✓ Testes A1, B1 e C1 – redução de 20% no valor de concentração;
 - ✓ Testes A2, B2 e C2 – redução de 50% no valor de concentração;
 - ✓ Testes A3, B3 e C3 – aumento de 20% no valor de concentração;
 - ✓ Testes A4, B4 e C4 – aumento de 50% no valor de concentração.

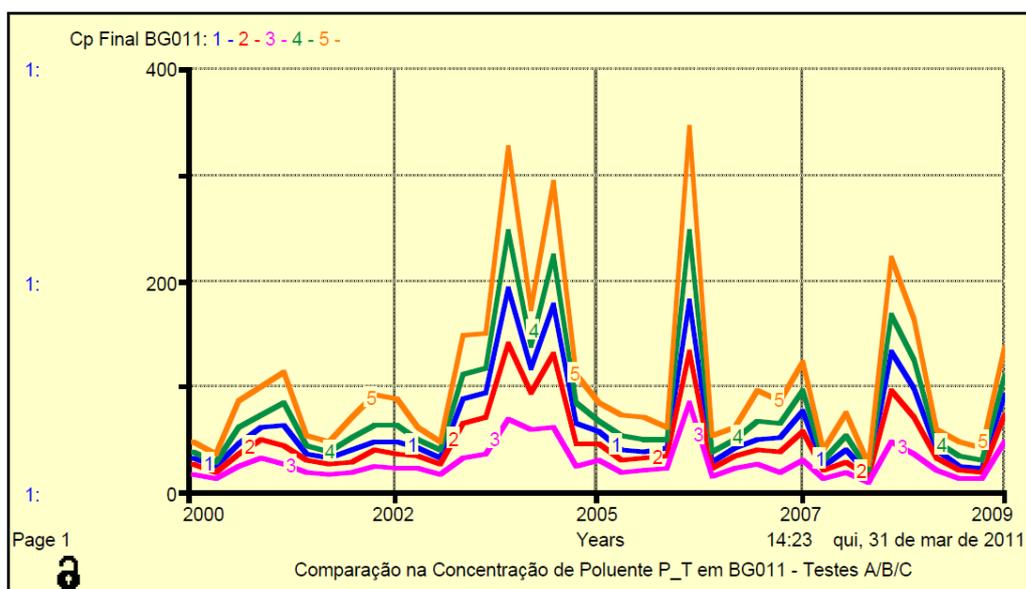
Conforme o IGAM (2008a, b, 2010) o uso do solo na BHRM está dividido entre a agricultura, mineração e atividades industriais. Na agricultura predominam as atividades de floricultura e horticultura. O ramo de mineração está presente na BHRM por meio das atividades de exploração de granito, feldspato e quartzo, extração de argila, areia e pedras para construção, e garimpo de ouro em pequena proporção. As atividades industriais são desenvolvidas em toda a bacia, especialmente as do ramo alimentício, metalúrgicas e produção de cimento.

Cumprir citar que para os testes de redução do valor de concentração dos poluentes, não foi considerado o limite natural (*Background*) para estes compostos, visto que não foi encontrada nenhuma pesquisa ou bibliografia que trate especificamente dos limites naturais do Fósforo nos cursos de água da BHRM. Conforme Menezes *et al.* (2009) e Marchesan *et al.* (2009) os valores

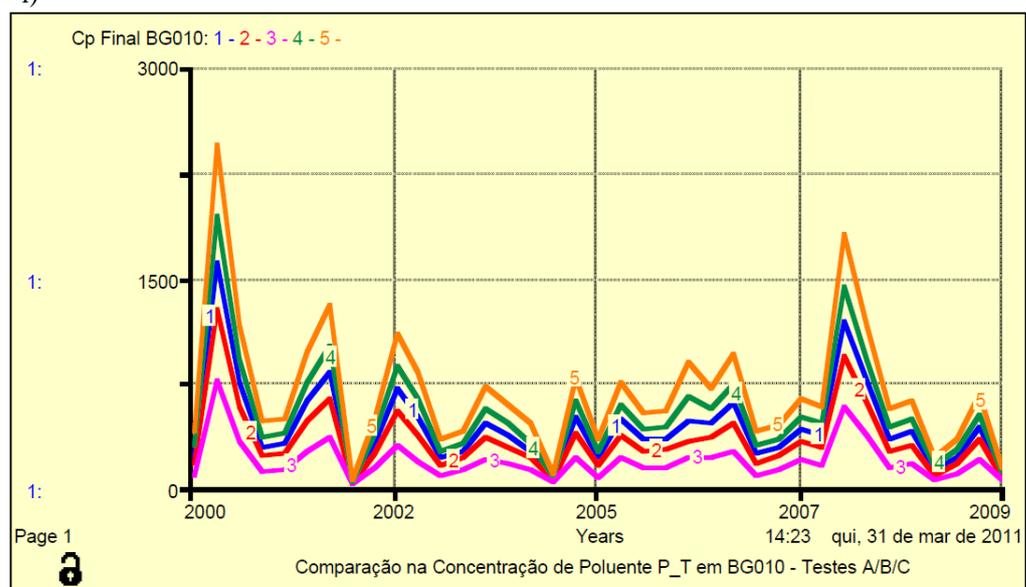
naturais para fósforo não ultrapassam 0,2mg/L na maioria das águas superficiais brasileiras, mas a legislação trabalha com 0,1mg/L como limite máximo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A FIG.6 apresenta os resultados encontrados para as variações de concentração do poluente fósforo total nos dois primeiros pontos de monitoramento da BHRM, para todos os testes. A bacia apresentou índices elevados de fósforo no ano de 2009, no período de estiagem, indicando a existência de fontes pontuais significantes.



i)



ii)

Figura 6 – Simulação da concentração dos poluentes P Total nos pontos de monitoramento BG011(i) e BG010(ii) para todos os testes de sensibilidade (g/m³).

Linha 1 = Teste 0; Linha 2 = Teste 1; Linha 3 = Teste 2; Linha 4 = Teste 3; Linha 5 = Teste 4

O teste de sensibilidade A na BHRM para a concentração do poluente fósforo total (P_T), nos pontos de monitoramento BG011, BG014 e BG017 (FIG.7, TAB.1) mostra que, apesar da variação no ponto BG011, -24,2 e 69,9%, os pontos BG014 e BG017 apresentam variação em relação ao teste A0, entre 0,0 e 0,5% e 0,0 e 0,1%, respectivamente.

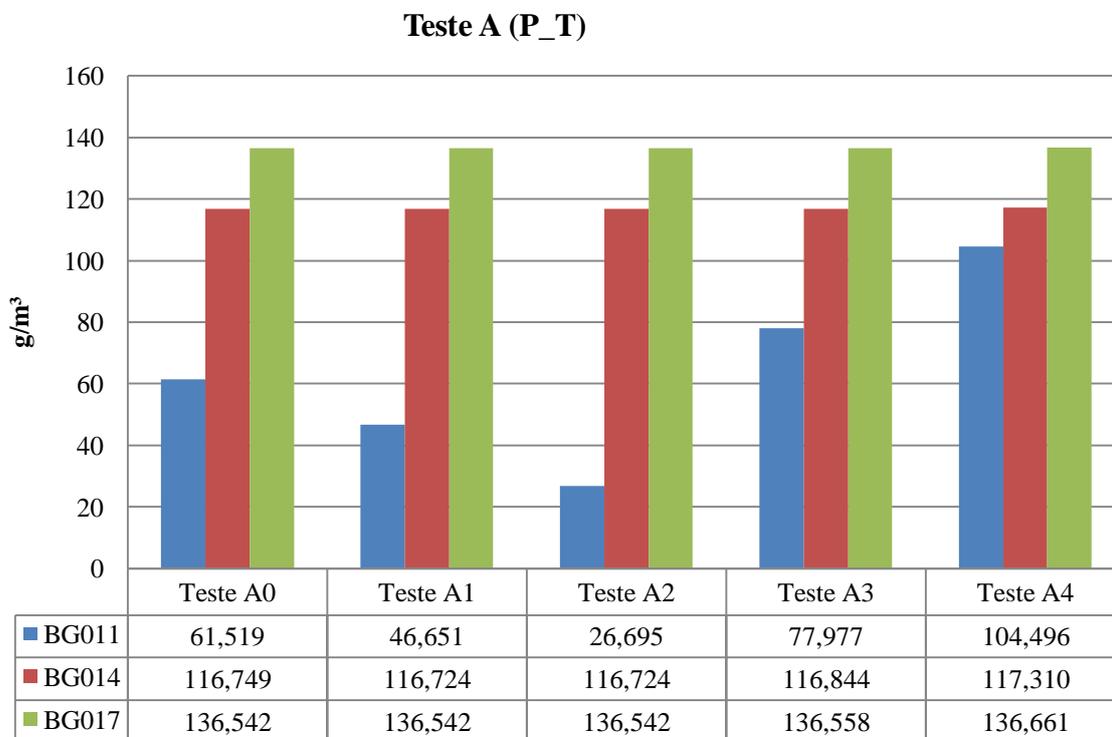


Figura 7 – Variação da concentração no teste A, valores médios, para o poluente P_T.

Tabela 1 – Resultados médios para o teste de sensibilidade A, para o poluente P_T, nos pontos de monitoramento testados na BHRM (g/m³)

| Testes | BG011 | BG014 | BG017 |
|----------|---------|---------|---------|
| Teste A0 | 61,519 | 116,749 | 136,542 |
| Teste A1 | 46,651 | 116,724 | 136,542 |
| Teste A2 | 26,695 | 116,724 | 136,542 |
| Teste A3 | 77,977 | 116,844 | 136,558 |
| Teste A4 | 104,496 | 117,310 | 136,661 |

Ao analisar o teste de sensibilidade B na BHRM para a concentração do poluente P_T, nos pontos de monitoramento BG010, BG014 e BG017 (FIG.8, TAB.2) nota-se que o ponto BG010 variou de maneira coerente com as alterações impostas, -22,9 e 58,2%; no entanto os pontos BG014 e BG017 variaram em relação ao teste B0 entre -2,2 e 7,5% e -0,7 e 2,3%, respectivamente.

Teste B (P_T)

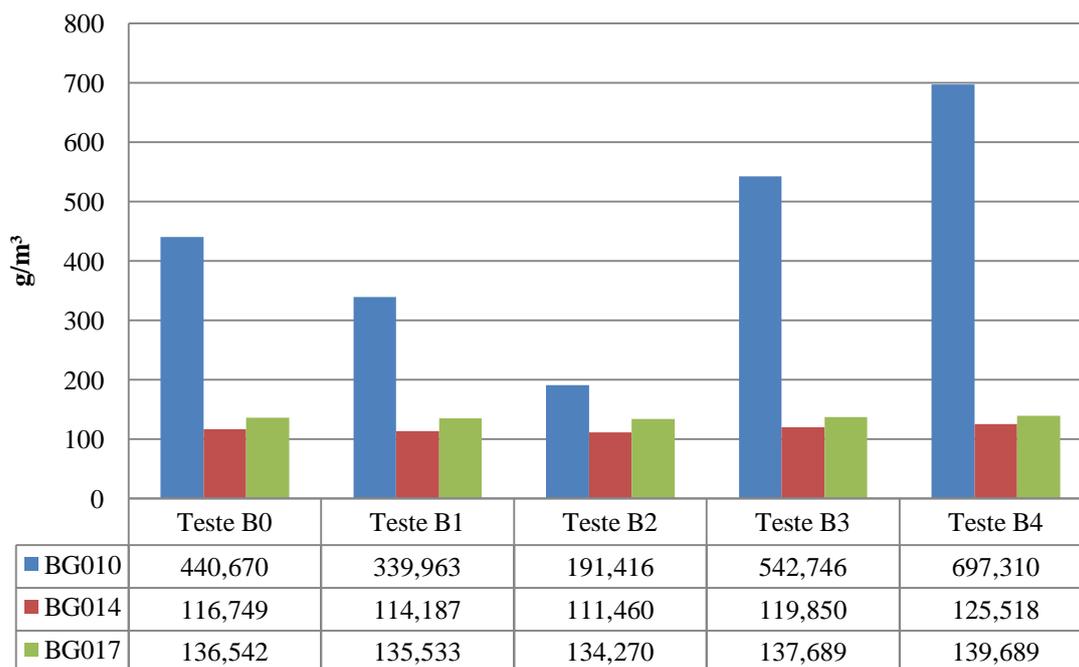


Figura 8 – Variação da concentração no teste B, valores médios para o poluente P_T.

Tabela 2 – Resultados médios para o teste de sensibilidade B, para o poluente P_T, nos pontos de monitoramento testados na BHRM (g/m³)

| Testes | BG010 | BG014 | BG017 |
|----------|---------|---------|---------|
| Teste B0 | 440,670 | 116,749 | 136,542 |
| Teste B1 | 339,963 | 114,187 | 135,533 |
| Teste B2 | 191,416 | 111,460 | 134,270 |
| Teste B3 | 542,746 | 119,850 | 137,689 |
| Teste B4 | 697,310 | 125,518 | 139,689 |

Ao analisar o teste de sensibilidade C na BHRM para a concentração do poluente P_T, nos pontos de monitoramento BG011, BG010, BG014 e BG017 (FIG.9, TAB.3) nota-se que os pontos BG010 e BG011 apresentaram alterações coerentes com percentual de alteração proposto, mas os pontos BG014 e BG017 variaram em relação ao teste C0, entre -2,2 e 8,6% e -0,7 e 2,6% respectivamente, de maneira muito semelhante ao teste B.

Teste C (P_T)

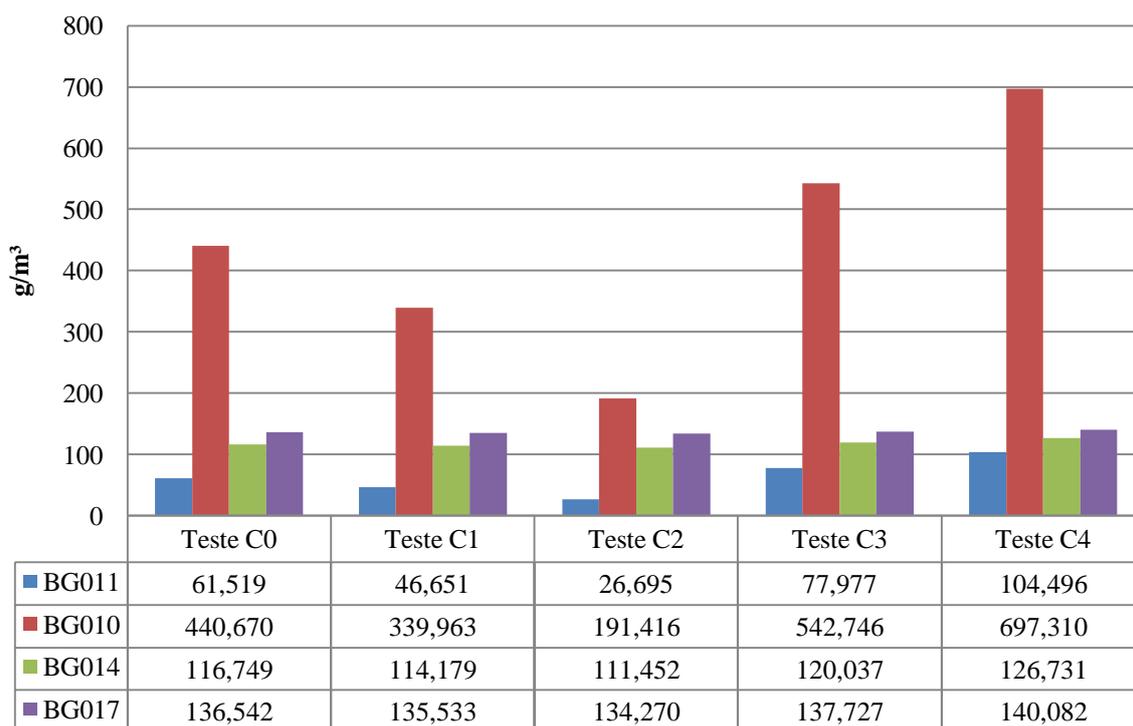


Figura 9 – Variação da concentração no teste C, valores médios para o poluente P_T.

Tabela 3 – Resultados médios para o teste de sensibilidade C, para o poluente P_T, nos pontos de monitoramento testados na BHRM (g/m³)

| Testes | BG011 | BG010 | BG014 | BG017 |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| Teste C0 | 61,519 | 440,670 | 116,749 | 136,542 |
| Teste C1 | 46,651 | 339,963 | 114,179 | 135,533 |
| Teste C2 | 26,695 | 191,416 | 111,452 | 134,270 |
| Teste C3 | 77,977 | 542,746 | 120,037 | 137,727 |
| Teste C4 | 104,496 | 697,310 | 126,731 | 140,082 |

A distância entre os pontos de monitoramento testados na simulação para o poluente fósforo total, influenciou os resultados da simulação. A distância é um fator que influencia os resultados entre os pontos testados BG010 e BG014, BG010 e BG017, BG011 e BG014, BG011 e BG017 nos três testes para o poluente fósforo total, indicando a existência de outros mecanismos dinâmicos ao longo do curso d'água que agem sobre a concentração do poluente P_T presente na BHRM.

A TAB.4 apresenta os valores em (g/m³) /m percorrido para o Teste A. Esses valores indicam que caso ocorra apenas variação no ponto de monitoramento BG011, os pontos BG014 e BG017 terão aumentados os resultados do poluente P_T, independentemente de ocorrer redução ou aumento na concentração no BG011. Porém, a variação entre os pontos de monitoramento, BG011 e BG017 para os Testes A3 e A4 apresentam resultados menores que os Testes A1 e A2, indicando

a possibilidade de entrada de águas com menor concentração desse poluente ou outro mecanismo de degradação entre os pontos de monitoramento.

Tabela 4 – Variação em (g/m³)/m no Teste A entre os pontos de monitoramento testados na BHRM, para o poluente Fósforo Total

| Testes | BG011-BG014 | BG011-BG017 |
|---------------|--------------------|--------------------|
| Teste A0 | 0,00080 | 0,00032 |
| Teste A1 | 0,00101 | 0,00038 |
| Teste A2 | 0,00130 | 0,00046 |
| Teste A3 | 0,00056 | 0,00025 |
| Teste A4 | 0,00019 | 0,00014 |

Os valores encontrados para a variação, no Teste B, TAB.5, entre os pontos de monitoramento BG010 e BG014, e, BG010 e BG017 indica que haverá redução na concentração do poluente, independente se ocorrer redução ou aumento na concentração no BG010. Mas, esta redução acompanha uma pequena variação entre os testes B0 e B4 indicando a pequena influência das alterações provocadas no BG010.

Tabela 5 – Variação em (g/m³)/m no Teste B entre os pontos de monitoramento testados na BHRM, para o poluente Fósforo Total

| Testes | BG010-BG014 | BG010-BG017 |
|---------------|--------------------|--------------------|
| Teste B0 | -0,02204 | -0,00166 |
| Teste B1 | -0,01536 | -0,00111 |
| Teste B2 | -0,00544 | -0,00031 |
| Teste B3 | -0,02877 | -0,00221 |
| Teste B4 | -0,03890 | -0,00304 |

Os valores encontrados para o Teste C para a variação entre os pontos de monitoramento BG011 e BG014, BG011 e BG017, BG010 e BG014, e, BG010 e BG017 confirmam os resultados dos Testes A e B, TAB.6.

Tabela 6 – Variação em (g/m³)/m no Teste C entre os pontos de monitoramento testados na BHRM, para o poluente Fósforo Total

| Testes | BG011-BG014 | BG011-BG017 | BG010-BG014 | BG010-BG017 |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Teste C0 | 0,00080 | 0,00032 | -0,02204 | -0,00166 |
| Teste C1 | 0,00098 | 0,00037 | -0,01536 | -0,00111 |
| Teste C2 | 0,00122 | 0,00045 | -0,00544 | -0,00031 |
| Teste C3 | 0,00061 | 0,00025 | -0,02876 | -0,00221 |
| Teste C4 | 0,00032 | 0,00015 | -0,03881 | -0,00304 |

A diferença da vazão nos pontos de monitoramento BG010, máxima de 5,67 m³/s, BG011, máxima de 68 m³/s, e o BG014, máxima de 86,47 m³/s, pode ser um dos fatores que influenciam a variação na concentração do poluente fósforo total, entre os pontos BG010 e BG014, e, BG011 e BG014. Visto que com uma vazão maior o processo de diluição ocorre com maior velocidade do que com uma vazão menor. Isso provavelmente ocorre devido à entrada de outros afluentes não identificados no modelo desenvolvido e com menor concentração destes poluentes.

Apesar da variação da concentração nos testes A, B e C nos pontos de monitoramento BG010 e BG011, esta é compensada pela maior vazão existente nos pontos de monitoramento BG014 e BG017, que promovem a diluição ao longo do curso d'água do Rio das Mortes.

Os resultados dos testes de sensibilidade A1 até A4, B1 até B4, e C1 até C4 para os pontos de monitoramento testados, variaram aproximadamente entre 111 e 140g/m³ para fósforo total. Estes resultados estão acima do limite máximo permitido, para fósforo total, de acordo com a DNC COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de Maio de 2008, para cursos d'água enquadrados como classe 2, cujo limite é de 0,100mg/L, ou 100g/m³ (MINAS GERAIS, 2008a), indicando a necessidade de um enquadramento diferente do atual.

CONCLUSÕES

Utilizaram-se técnicas de dinâmica de sistemas para simular e avaliar as condições da poluição por Fósforo Total, a jusante dos pontos de monitoramento na Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes.

O modelo dinâmico para a avaliação da concentração de poluentes na BHRM apresenta semelhança entre os resultados simulados e os dados consolidados, apresentados nas análises e relatórios de monitoramento da qualidade das águas superficiais dos anos 2000 até 2009. Assim, os valores simulados podem servir como parâmetros para avaliar prováveis alterações na concentração de poluentes na BHRM mostrando que o modelo poderá ser utilizado para prever as condições futuras nesta e em outras bacias.

Os resultados da modelagem e simulação de fósforo total, no trecho compreendido entre os pontos de monitoramento testados, apresentam valores acima do permitido para o atual enquadramento, classe 2, fato que compromete a avaliação ou enquadramento da qualidade das água.

Os resultados da simulação podem ser utilizados pelo Comitê de Bacia Hidrográfica Campos das Vertentes (CBHCV), como uma indicação da situação futura da BHRM caso ocorra alguma alteração nas concentrações destes poluentes.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, Aziz Nacib. *Os Domínios de natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas*. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. *Bacia do Paraná*. 2010a. Disponível em <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/parana.aspx>> Acessado em 10 abr. 2010.
- _____. *HIDROWEB*. 2010b. Disponível em <<http://www.hidroweb.ana.gov.br>> Acessado em 10 abr. 2010.
- ANDRADE, Carlos Drummond. *Brasil, Terra e Alma*. Rio de Janeiro. Editora do Autor, 1967. 250 p.
- ANGELINI, Ronaldo. Ecosistemas e Modelagem ecológica. In: POMPEO, Marcelo L. M. (Org.). *Perspectivas da Limnologia no Brasil*. 1 ed. São Luís (MA): Gráfica e Editora União, 1999, v. 1, p. 1-19. Disponível em <http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_docman&Itemid=183> Acessado 22 mai. 2010.
- BITTENCOURT, Simone; GOBBI, Eduardo Felga. Carga máxima de fósforo admissível ao reservatório Piraquara II, uma aplicação do processo TMDL. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 595-603, jun. 2006.
- BRASIL, *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constitui%C3%A7ao.htm>, acessado em 15 mai. 2009.
- _____. *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Lei federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. 1997. Brasília. Disponível em <<http://www.planalto.gov.br>>, acessado em 15 mai. 2009.
- _____. *Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005*, Brasília, Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legi.cfm>>, acessado em 10 abr. 2009.
- CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. *Caracterização ambiental da bacia do Rio das Mortes: relatório técnico final: etapa 1*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1988. p. 148-377. Anexos.
- DEVLIN, M.J., BRODIE J. Terrestrial discharge into the Great Barrier Reef Lagoon: nutrient behavior in coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, v. 51, p. 9–22, 2005.
- FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais em 2000: projeto sistema de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2001. 346p.
- FUNDAÇÃO RURAL MINEIRA. *Atlas digital das águas de Minas: uma ferramenta para o planejamento e gestão dos recursos hídricos*. Coordenação técnica, direção e roteirização Humberto Paulo Euclides. Belo Horizonte: RURALMINAS; Viçosa: UFV. 2005. 1 CD-ROM + 1 manual (78p.). ISBN 85-7601-082-8.
- GONÇALVES, Celso S.; RHEINHEIMER, Danilo dos S.; PELLEGRINI, João B. R.; KIST, Sinval L. Qualidade da água numa microbacia hidrográfica de cabeceira situada em região produtora de fumo. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande, v. 9, n. 3, p.391-399, 2005.
- GOOGLE EARTH: programa da Internet. Versão 6.0. Google, 2010. Disponível em <earth.google.com.br/>, acessado em 21 set. 2010.
- IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Águas de Minas*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2003a. CD-ROM
- _____. *Águas de Minas*. 2009a Disponível em <<http://aguas.meioambiente.mg.gov.br/bacias/grande/GD01%20a%20GD08/GD01%20a%20GD08.php>>, acessado em 10 mar. 2009.

- _____. *Qualidade das águas superficiais no Estado de Minas em 2001*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2002. 205p.
- _____. *Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio Grande em 2002*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2003b. 245p.
- _____. *Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio Grande em 2003*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2004. 262p.
- _____. *Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio Grande em 2004*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2005. 248p.
- _____. *Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio Grande em 2005*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2006. 164p.
- _____. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais na Bacia do Rio Grande em 2006*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2007. 183p.
- _____. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais na Bacia do Rio Grande em 2007*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2008a. 196p.
- _____. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais na Bacia do Rio Grande em 2008*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2008b. 304p.
- _____. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais na Bacia do Rio Grande em 2009*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010. 312p.
- IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. *Cidades históricas; inventário e pesquisa: Projeto Piloto Tiradentes*. 1. ed. Brasília: Senado Federal. 2005. 184 p.
- JØRGENSEN, S.E., BENDORICCHIO, G. *Fundamentals of Ecological Modelling*. Elsevier Science, Ltd. Third edition. 2001. 544p.
- LANNA, Antonio Eduardo. A economia dos recursos hídricos: os desafios da alocação eficiente de um recurso (cada vez mais) escasso. *Estud. av.*, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200008&lng=en&nrm=iso>, acessado em 21 abr. 2009.
- MALMQVIST, Björn, RUNDLE, Simon. Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation*, v. 29, p. 134–153, 2002.
- MANSOR, Maria T. C. *Potencial de poluição de Águas Superficiais por Fontes não Pontuais de Fósforo na Bacia Hidrográfica do ribeirão do Pinhal, Limeira, SP*. 2005. 189 f. Universidade de Campinas, Campinas, 2005.
- MARCHESAN, Enio, SARTORI, Gerson Meneghetti Sarzi, REIMCHE, Geovane Boschmann, AVILA, Luis Antonio de, ZANELLA, Renato, MACHADO, Sérgio Luiz de Oliveira, MACEDO, Vera Regina Mussoi, COGO, Juliana Pivetta. Qualidade de água dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Cienc. Rural*, Santa Maria, v. 39, n. 7, out. 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782009000700015&lng=pt&nrm=iso>, acessado em 30 mar. 2011.
- MAZZINI, Ana Luiza Dolabela de Amorim. *Dicionário educativo de termos ambientais*. 4.ed. Belo Horizonte: Editora do Autor, 2008. 534 p.
- MENEZES, Juliana M.; PRADO, R.B.; SILVA JR., G.C.; MANSUR, K.L.; OLIVEIRA, E.S. Qualidade da água e sua relação espacial com as fontes de contaminação antrópicas e naturais: bacia hidrográfica do rio São Domingos - RJ. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v. 29, n. 4, 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162009000400019&lng=pt&nrm=iso>, acessado em 30 mar. 2011.
- MINAS GERAIS. Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999. 1999. *Legislação Estadual de Recursos Hídricos*. Disponível em <<http://www.semad.mg.gov.br>>, acessado em 15 mai. 2009.

_____. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de Maio de 2008. 2008a. *Legislação Estadual de Recursos Hídricos*. Disponível em <<http://www.semad.mg.gov.br>>, acessado em 15 mai. 2009.

MONTE, Luigi. A methodology for modeling the contamination of moving organisms in water bodies with spatial and time dependent pollution levels. *Ecological Modelling*, v. 158, p. 21-33, 2002.

MOREIRA, J. A.; VITTI, D. M. S. S.; PATINO, R. M.; SILVA, T. S.; BUENO, I. C.; BERENCHTEIN, B. Impacto ambiental provocado pelo P em dietas suplementadas com enzima fitase e proteína ideal para suínos em crescimento: estudo do fluxo do P no metabolismo animal. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.*, Belo Horizonte, v. 62, n. 5, p. 1206-1215, out. 2010.

PALMER, Margaret A., ALLAN, J. David. Restoring Rivers. *National Academy of Science: Issues in Science and Technology*, v.22, p. 40-48, 2006.

PARK, Richard A., CLOUGH, Jonathan S., WELLMAN, Marjorie Coombs. AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems. *Ecological modeling*, v.213, p.1–15, 2008.

PIGNATTI, Marta G. Saúde e ambiente: as doenças emergentes no Brasil. *Ambient. soc.*, Campinas, v.7, n.1, p.133-147, jun. 2004.

RECKHOW, Kenneth H. Water quality simulation modeling and uncertainty analysis for risk assessment and decision making. *Ecological Modelling*, v.72, p. 1-20, 1994.

SÁNCHEZ-ROMÁN, Rodrigo M.; FOLEGATTI, Marcos V.; ORELLANA-GONZALEZ, Alba M. G. . Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá utilizando modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.29, n.4, 2009. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v29n4/v29n4a8.pdf>>, acessado em 09 ago. 2010.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; ORELLANA GONZALEZ, A. M. G.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; SILVA, M. A. A. S.. Dinâmica de sistemas e a modelagem com o uso do programa STELLA dos recursos hídricos da bacia do Rio Preto, afluente do Rio Paracatu. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, Aracaju, v.1, n.1, p.16-42, 2010.

SCHWARZENBACH, Rene´ P., ESCHER Beate I., FENNER Kathrin, HOFSTETTER Thomas B., JOHNSON C. Annette, von GUNTEN Urs, WEHRLI Bernhard. The Challenge of Micropollutants in Aquatic Systems. *Science*, v.313, p. 1072-1077, 2006.

TOLEDO, Luís Gonzaga de, NICOLELLA, Gilberto. Índice de Qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. *Scientia Agricola*, 2002, v.59, n.1, p.181-186. Disponível em <www.scielo.br/pdf/sa/v59n1/8092.pdf>, acessado em 22 mai. 2010.

TUCCI, Carlos E. M.. [et al.]. (org). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4.ed. Porto Alegre: UFRGS; ABRH, 2007.

VASCONCELOS, Flávio de Moraes, TUNDISI, José Galizia, TUNDISI, Takako Matsumura. *Avaliação da Qualidade de Água – Base Tecnológica para a Gestão Ambiental*. 1ª Ed. Belo Horizonte: SMEA, 2009.

VOINOV, A., COSTANZA, R., WAINGER, L., BOUMANS, R., VILLA, F., MAXWELL, T., VOINOV, H. Patuxent landscape model: integrated ecological economic modeling of a watershed. *Environmental Modelling and Software*, v.14, p. 473–491, 1999a.

VOINOV, A., VOINOV, H., COSTANZA, R. Surface water flow in landscape models: 2. Patuxent case study. *Ecological Modelling*, v. 119, p.211–230, 1999b.