

Uso de Simulação Computacional para Planejamento de um Sistema Hídrico: Estudo de Caso Qualitativo e Quantitativo

Liliane Lazzari Albertin, Frederico Fabio Mauad, Luiz Antonio Daniel

Escola de Engenharia de São Carlos – USP

lilianelazzari@hotmail.com, mauadffm@sc.usp.br, ldaniel@sc.usp.br

Recebido: 16/03/05 – revisado: 31/05/06 – aceito: 21/07/06

RESUMO

O conflito pelo uso da água aumenta na mesma proporção em que ela se esgota devido, principalmente, ao desperdício, à distribuição desigual, ao aumento e diversificação do consumo e à degradação de sua qualidade. Frente a esta situação, este trabalho avalia a disponibilidade hídrica quantitativa e qualitativa da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim, SP. Através da modelagem da bacia, aplicação de um modelo de simulação e implementação de cenários de redução na emissão da carga orgânica doméstica, é analisado o desempenho do sistema de recursos hídricos, o conflito existente entre os usos múltiplos e a qualidade da água avaliada pela concentração de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio nas águas do rio que recebe efluentes domésticos, muitos deles sem nenhum tratamento. Apesar da quantidade de água ser suficiente para atender às demandas, o estudo mostra que a geração de energia elétrica está comprometida e a água está se esgotando qualitativamente, evidenciando a necessidade e urgência de se implantar estações de tratamento de esgoto.

Palavras-chave: planejamento de recursos hídricos, simulação computacional, qualidade da água, quantidade da água.

INTRODUÇÃO

Mesmo privilegiado quanto à sua disponibilidade de água, o Brasil possui sérios problemas de escassez hídrica que decorrem, fundamentalmente, da combinação entre o crescimento exagerado das demandas localizadas e a degradação da qualidade das águas. Esse quadro é consequência dos desordenados processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola.

A disputa pelo uso da água é verificada em diversas regiões. Em geral, o Estado de São Paulo apresenta quadro preocupante em relação à disponibilidade, demanda e poluição descontrolada dos recursos hídricos.

O estudo dos aspectos quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos não pode ser dissociado. A violação dos padrões admissíveis da qualidade da água torna-a imprópria para determinados usos e a interpretação de dados qualitativos não proporciona conclusões significativas a menos que baseada na variabilidade espacial e temporal do regime hidrológico. A variação no espaço e no tempo da disponibilidade, como da demanda, leva à necessidade de criação de políticas de planejamento e gestão de recursos hídricos.

O objetivo deste trabalho é fazer a modelagem dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim, localizada no extremo norte do Estado de São Paulo. Esta região apresenta atividade agrícola de irrigação intensiva e suas atividades no setor primário são bem desenvolvidas e, no secundário, as indústrias de couro e alimentar apresentam expansão, contribuindo com significativa carga poluidora. De acordo com Engevix (2001), desde o início do século XX, estudos vêm sendo desenvolvidos para a implantação de aproveitamentos hidrelétricos ao longo do rio Sapucaí-Mirim. Tais estudos conduziram à construção de duas usinas em operação, Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Dourados e PCH São Joaquim, ambas de propriedade da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e consideradas a fio d'água. Em 1998, foi outorgada à CPFL a autorização para continuação dos estudos dos aproveitamentos e após análises, a empresa considerou viável a implantação de mais três usinas que estão em projeto básico: PCH Palmeiras, PCH Anhanguera e PCH Retiro.

Com o auxílio do modelo matemático MIKE BASIN, desenvolvido pela empresa dinamarquesa *DHI Water & Environment*, é feita a avaliação de cenários e são analisados os conflitos entre usos múltiplos da água, especificamente entre abastecimento urbano e industrial, irrigação e geração de energia

elétrica; é simulada a evolução das concentrações das variáveis OD e DBO no curso do rio Sapucaí-Mirim, sujeito ao lançamento de esgoto doméstico, a maioria sem tratamento; são analisadas as mudanças quantitativa e qualitativa após a implantação das PCHs Palmeiras, Anhangüera e Retiro; e é verificada a eficiência de uma estratégia para melhorar a qualidade da água através da implantação de sistemas de tratamento de esgoto nos municípios que não os têm.

O modelo matemático MIKE BASIN associa técnicas de simulação e modelagem em rede de fluxo e é estruturado em uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente do ArcView do Sistema de Informações Geográficas. A simulação das variáveis de qualidade da água é feita através do transporte no estado estacionário nos arcos do sistema. Dentre outras características do modelo, destacam-se seu rápido tempo de processamento e sua flexibilidade e facilidade na representação dos sistemas hídricos.

MODELOS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE SISTEMAS HÍDRICOS

Os métodos mais utilizados para auxiliar na análise de sistemas de recursos hídricos são os modelos de simulação e otimização. A análise de sistemas é promissora uma vez que a escassez de água está preocupando a população que cada vez mais pressiona para o uso eficiente da água.

Modelos de simulação são bem aceitos na área de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos e são usados para dar a resposta detalhada do sistema sujeito a diversas condições. A principal desvantagem do uso da simulação é que frequentemente há um grande número de soluções viáveis para serem investigadas e, portanto, a solução ótima não é obtida. Os modelos de simulação podem ser facilmente desenvolvidos com os softwares disponíveis no momento e na maioria das vezes são amigáveis. Estudos feitos com modelos de simulação para modelagem de bacia hidrográfica e usos da água são amplamente discutidos na literatura, como os trabalhos de Azevedo et al. (1998), Levy & Baecher (1999), Ritschard et al. (1999), Lima (2002) e Peixoto (2002).

Muitos problemas de alocação dos recursos hídricos são resolvidos através da programação linear, introduzida na década de 50. Geralmente, o objetivo é encontrar a melhor estratégia de alocação de água dentro de um dado espaço de tempo e num

sistema complexo (Yen & Chen, 2001). O problema é que nem sempre a função objetivo e as restrições encontram-se na forma linear e modificações são feitas para linearizar o problema. Porém, a programação linear é talvez a única que aponta o ótimo global.

Otimização não linear é usada em situações nas quais a função objetivo ou as restrições não são lineares. Em geral a solução é um vetor de variáveis de decisão que otimiza a função objetivo não linear sujeita a restrições não lineares (Sylla, 1995). A principal limitação em aplicar este tipo de programação nos problemas de gerenciamento dos recursos hídricos é que o algoritmo não distingue o ótimo local do ótimo global.

A programação dinâmica é vantajosa por não requerer uma forma especial da função objetivo e restrições, sendo frequentemente usada nos problemas de sistemas hídricos. O problema deve ser discretizado em um número finito de estágios. Cada estágio tem um número possível de estado do sistema e a solução ótima é identificada para cada estágio individualmente. O aumento do número de estágios e das variáveis de estado causa o problema da dimensionalidade da programação dinâmica (Braga et al., 1991; Alaya et al., 2003).

Por causa das limitações impostas por cada método e pelo desenvolvimento dos computadores e *softwares*, pesquisadores têm adotado novas técnicas, como a lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, “simulated annealing” e “ant colony algorithms” para encontrar o ótimo global em problemas lineares ou não (Jairaj & Vedula, 2000; Reis & Akutsu, 2002; Tung et al., 2003).

A primeira tarefa da engenharia ambiental foi quantificar as respostas físicas, químicas e biológicas que o meio ambiente dava para as alterações impostas pelo homem em relação à água. Estimulados pela necessidade de controle da poluição que ameaçava a saúde da população norte-americana, foram iniciados estudos em 1920 no rio Ohio, EUA, para mensurar as fontes de poluição deste rio e os impactos causados na água usada para abastecimento urbano. Deste estudo foi herdada a primeira aplicação da modelagem matemática que caracterizou o balanço do oxigênio dissolvido nos rios, a equação de Streeter-Phelps (Orlob, 1992).

Esta equação se tornou conhecida e foi motivo de vários estudos realizados por diversos pesquisadores que queriam cada vez mais aprender a partir dos dados de campo e laboratoriais. Porém, ela não conseguia descrever com precisão os complexos sistemas aquáticos reais, o que só foi possível com o

surgimento dos computadores após a II Guerra Mundial.

Chega-se na década de 60, que trouxe um aumento do interesse público no que se refere ao declínio da qualidade da água. A pressão pública se manifestou na imposição de controles e financiamento de projetos para prevenção e tratamento da poluição. Começaram os investimentos em técnicas de computação e análise de sistemas e um dos primeiros modelos computacionais que surgiram para gerenciamento da qualidade dos recursos hídricos é o que foi criado por Thomann (1963), denominado “Delaware Estuary Comprehensive Study” (DECS). O pesquisador foi auxiliado pela Administração Federal de Controle da Poluição das Águas dos Estados Unidos, atual Agência de Proteção Ambiental (“U. S. Environmental Protection Agency” – EPA) progenitora do conhecido software QUAL 2E. DECS era uma extensão da equação de Streeter-Phelps, pois considerava mais de uma fonte pontual de poluição e avaliava estratégias alternativas para controle da poluição, no caso, media os impactos causados pela falta de oxigênio dissolvido.

A partir de 1970, o modelo simples de Streeter-Phelps começou a aparecer em uma variedade de formas computadorizadas. DOSAG foi produzido em 1970 pela “Texas Water Development Board” (TWDB) resolvendo sistemas de rios principais e tributários com coeficientes de velocidade variáveis. Foi seguido pelo QUAL I criado no mesmo ano também pela TWDB. Em adição na relação OD-DBO, simulava troca de energia na interface ar-água, permitindo o ajuste da temperatura nas constantes de velocidade. Uma versão melhorada, QUAL II, foi desenvolvida pela EPA em 1973 e incluía a capacidade de simular sistemas de rios mais complexos, fluxos estacionários e não estacionários e avaliava os impactos que as cargas de nutrientes causavam no ecossistema aquático (Orlob, 1984).

Com algumas modificações, ficou disponível o modelo de qualidade da água que vem sendo muito utilizado, o QUAL 2E, que simula 15 índices de qualidade, dentre eles: oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, temperatura, nitrogênio total, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total, fósforo dissolvido e coliformes. Ainda, permite avaliar o impacto causado pelo despejo de águas residuárias domésticas e industriais.

Em geral, quando se quer minimizar a poluição dos rios, a primeira iniciativa é eliminar as fontes pontuais de poluição, uma vez que estas são mais fáceis de identificar e tratar. Contudo, o trabalho requerido é custoso e demorado, o que torna o es-

tudo do gerenciamento uma opção para melhorar a qualidade da água da bacia

Considerando a localização, descarga e constituintes dos rejeitos, pode-se encontrar soluções de forma que os mesmos sejam tratados até um ponto aceitável antes de serem lançados diretamente no curso d’água ou, alternativamente, mudar o lançamento para outro ponto conveniente. Se o padrão de emissão fixado é apropriado, é correto dizer que todas as estações de tratamento terão as mesmas concentrações admissíveis de seus efluentes prescritos, de forma que a decisão se apoiará fundamentalmente na opção de menor custo. Caberá ao planejador analisar a conveniência e economia.

As dificuldades surgem quando os padrões de descarga dos efluentes são fixados individualmente para atingir um objetivo particular de qualidade da água, sendo necessário avaliar o impacto causado pelas diversas opções de lançamento no rio. Deve-se fazer um prognóstico do impacto causado pelo lançamento de diferentes combinações de concentrações dos poluentes de uma dada vazão de águas residuárias e a posição que localiza o lançamento pontual não é imediatamente óbvia, uma vez que se deve levar em conta processos de diluição, autodepuração do corpo d’água, etc. Para solucionar este problema foram desenvolvidos modelos de simulação baseados em processos como o QUAL 2E, TOMCAT (Bowden & Brown, 1983; Drolc & Koncan, 1999; Wang & Jamieson, 2002), entre outros. Todavia, estes modelos não incluem custos de engenharia e não são otimizantes, de forma que, para encontrar a solução ótima, é necessário fazer uma análise de tentativas e erros. A solução para incluir a otimização nos processos de planejamento é dispor de algumas formas de programação matemática.

LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ-MIRIM

Definida como Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI-08) pela Lei nº 9034/94, de 27 de dezembro de 1994, a Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (Figura 1), Estado de São Paulo, configura área de 9167 km², da qual fazem parte 22 municípios totalizando população de 620533 habitantes. Dentre eles, 82,13% é composto de população urbana.

Considerando os principais afluentes da UGRHI 08, foram delimitadas sete sub bacias, dentre elas, Alto, Médio e Baixo Sapucaí (Figura 2).

Estas três compreendem área de 5046 km² e população estimada de 518864 habitantes.

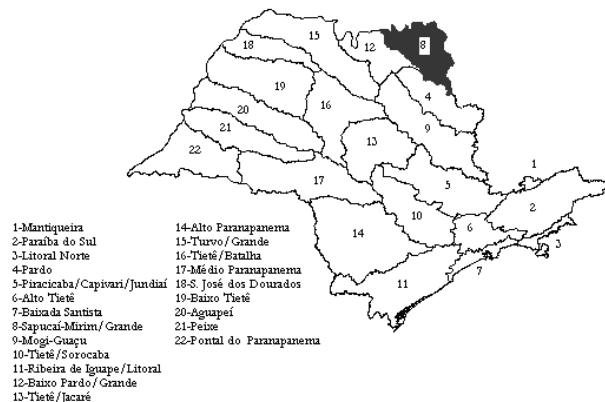


Figura 1 - Localização das UGRHs no Estado de São Paulo.



Figura 2 - Principais sub bacias que compõem a UGRHI Sapucaí-Mirim/Grande.

Após percorrer 337 km, totalmente na província geológica das Cuestas Basálticas, o rio Sapucaí-Mirim, principal rio constituinte da bacia, desemboca no rio Grande drenando muitos solos férteis com predomínio de terra roxa. O clima predominante é o tropical úmido com estiagem no inverno, cujo total de chuva no período seco é inferior a 30 mm. A pluviosidade média anual atinge 1500 a 2000 mm. Como na maior parte do Estado de São Paulo, o período chuvoso ocorre de outubro a março, recebendo cerca de 80% das chuvas anuais. O período mais seco vai de abril a setembro, com o trimestre mais seco entre junho e agosto, onde ocorrem cerca de 5% das chuvas.

Os principais ramos industriais são: madeira, borracha, couro e peles, vestuário, calçado e artefatos, bebidas e alimentos. Do total, 44% das indústrias presentes na região são curtumes, muito deles sem tratamento de seus resíduos.

O uso predominante do solo é agrícola, ocupando 52,1% do total da área da bacia. Destacam-se as culturas de café, milho, soja, algodão, cultivado em sistema de rotação com soja e milho, arroz e cana-de-açúcar.

As demandas de água oriundas de captação superficial para abastecimento urbano e industrial de cada município foram fornecidas pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000) e as mais representativas estão relacionadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Captação para abastecimento urbano das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí.

Município	Consumo (m ³ /s)
Batatais	0,0944
Franca	0,05
Ipuã	0,0417
São Joaquim da Barra	0,1273
São José da Bela Vista	0,0278

Fonte: Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000).

Foi considerada apenas uma captação superficial cadastrada para uso da água na irrigação. Esta retirada, de 0,0036 m³/s, corresponde à cidade de Patrocínio Paulista, localizada na sub-bacia do Alto Sapucaí. Essa vazão corresponde a um dado de outorga pelo direito do uso da água que não condiz com a realidade, tendo em vista a vocação agrícola da região.

Tabela 2 - Captação para abastecimento industrial das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí.

Município	Indústria	Demanda (m ³ /s)	Período (h/dia)	Demanda mensal (m ³ /mês)
Batatais	1	0,0010	5	540
Batatais	2	0,0653	24	169257,6
Patrocínio Paulista	3	0,0019	24	4924,8
São Joaquim da Barra	4	0,0133	24	34473,6

Fonte: Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000).

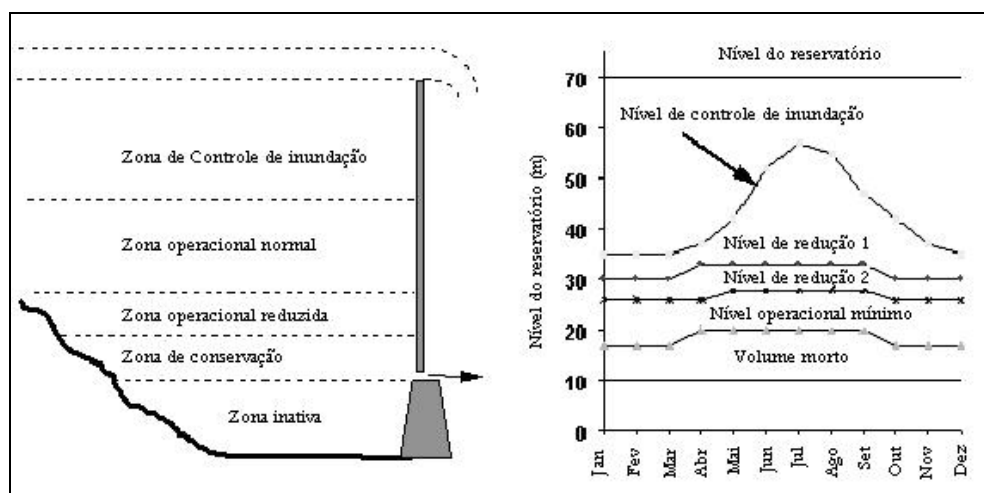


Figura 3 - Zona de armazenamento dos reservatórios.

O rio Sapucaí-Mirim não possui grandes usinas hidrelétricas, mas as PCHs de Dourados e São Joaquim produzem aproximadamente 18,75 MW. Na Tabela 3 estão contidas algumas informações referentes a estas usinas.

Tabela 3 - Dados principais das PCHs Dourados e São Joaquim.

Dados	Dourados	São Joaquim
N. A. Montante (m)	587,34	582,65
N. A. Jusante (m)	557,26	554,80
Área do reservatório (km ²)	2,70	0,93
Volume acumulado total (hm ³)	0,035	2,00
Potência instalada (MW)	10,8	8,05
Energia assegurada (MW)	7,76	5,63

N. A.: Nível da Água

Fonte: Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000).

Tabela 4 - Dados principais das PCHs em projeto básico.

Dados	Palmeiras	Anhangüera	Retiro
N. A. Montante (m)	556,0	540,5	523,0
N. A. Jusante (m)	542,7	523,1	509,8
Área do reservatório (km ²)	2,67	2,00	3,13
Vol. Acumulado total (hm ³)	16,50	12,00	16,46
Potência instalada (MW)	13,60	18,50	14,40
Energia assegurada (MW)	6,91	8,91	7,17

Fonte: Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000).

O local de implantação das PCHs Palmeiras, Anhangüera e Retiro situa-se no curso do rio Sapucaí-Mirim, no seu trecho entre os municípios de São Joaquim da Barra e Guará. Os principais dados destas três usinas estão na Tabela 4.

MODELO COMPUTACIONAL MIKE BASIN

O MIKE BASIN é um modelo hidrológico utilizado como ferramenta para gerenciamento dos recursos hídricos de toda a bacia hidrográfica ou parte dela. Os rios principais e seus tributários são representados no modelo através de uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente do ArcView GIS, permitindo integração com este sistema de informação geográfica. Todas as informações relativas à configuração da rede são editadas na tela do computador.

O modelo aplica balanço de massa em toda rede de arcos e nós e encontra soluções no estado estacionário para cada intervalo de tempo, diário ou mensal, definido pelo usuário. Essa aproximação é adequada para sistemas que não variam bruscamente no tempo.

Vários pesquisadores utilizaram o modelo em suas pesquisas, dentre as quais merecem destaque: Storm (1999) aplicou-o na bacia do rio Cape Fear na Carolina do Norte (EUA) e permitiu a visualização geográfica da rede de fluxo e componentes como retiradas, descargas e reservatórios; Dyrbak (2000) utilizou-o em um estudo para otimizar as regras de operação de um sistema de reservatórios

na Polônia; Kjeldsen & Rosbjerg (2001) usaram o modelo para avaliar sistemas hídricos através de um novo critério de sustentabilidade; Lima (2002), com o auxílio do MIKE BASIN, analisou os conflitos entre os usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia no Estado de São Paulo; Jorgensen (2002) examinou a qualidade da água da bacia do rio Sungai Skudai, Dinamarca, considerando vários cenários de redução da emissão da carga orgânica industrial; e Albertin (2004) fez o planejamento de quantidade e qualidade dos recursos hídricos superficiais de uma bacia hidrográfica do Estado de São Paulo, através da simulação e avaliação de cenários.

Os rios são representados pelos arcos do sistema e seu escoamento é simulado pelo método de Muskingum.

A simulação de reservatórios destinados aos usos múltiplos da água é feita através da avaliação do desempenho das políticas operacionais, uma vez fornecida as regras operacionais e curvas cota-área-volume. O modelo considera o reservatório como um único armazenamento físico e todos os usuários captam água do mesmo volume disponível.

Deve-se fornecer o nível do reservatório, em metros, existente no início da simulação e estabelecer a prioridade dos diversos usos que captam água do reservatório. As regras de operação são definidas para várias zonas de armazenamento, como demonstrado na Figura 3, e podem variar com o tempo.

Na Figura 3 pode-se considerar:

1. Zona de controle de inundação: reservada para diminuir o impacto de grandes inundações. Em circunstâncias normais, o nível do reservatório é mantido no nível de controle de inundação para proteger contra enchentes e armazenar água para abastecimento. Se o nível da água estiver nesta zona, a água é liberada segundo a vazão máxima definida pelo usuário.
2. Zona operacional normal: reserva de água para todas as demandas.
3. Zona operacional reduzida: se o nível de água estiver nesta zona, as demandas são atendidas parcialmente. Em períodos de seca, a liberação do reservatório pode ser reduzida de acordo com a fração definida para cada usuário. Se o reservatório estiver no nível reduzido 1, a demanda para determinado usuário é reduzida por um fator de redução 1. Se o reservatório estiver no nível 2 abaixo de 1, a demanda será reduzida por um fator de redução 2.

4. Zona de conservação: se a água estiver nesta zona, só será liberada para manutenção da vazão mínima especificada.
5. Zona inativa: volume morto do reservatório. Apenas evaporação, precipitação e infiltração influenciarão esta zona.

O modelo calcula geração de energia em conexão com a operação de reservatórios. Os principais dados necessários são a potência gerada pela usina, nível da água a jusante da usina (necessário para calcular o desnível geométrico) e a eficiência das turbinas.

As demandas de água para irrigação e abastecimento urbano e industrial são representadas pelos nós e seus valores são fornecidos diretamente através de séries temporais, em m^3/s .

A simulação das variáveis de qualidade da água é feita através do transporte no estado estacionário nos arcos do sistema. As variáveis consideradas no modelo são OD, DBO, DQO, amônia (NH_3), nitrato (NO_3), fósforo total, coliformes e qualquer outra substância de interesse, desde que sua cinética seja de primeira ordem. O decaimento da DBO é descrito pelo modelo de Streeter-Phelps.

Os valores dos parâmetros das equações de balanço de massa e cinética de reações são definidos no início da simulação. O modelo informa valores padrões dos coeficientes de velocidade referentes à temperatura de 20 °C. A correção da temperatura pode ser feita pela equação de Arrhenius.

AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS

Na Figura 4 é apresentada a rede de fluxo utilizada no modelo. Ela representa a situação atual da configuração do rio Sapucaí-Mirim com retiradas de água e lançamentos de águas residuárias. Apesar de não possuir escala, nela estão contidas informações geográficas das cidades, rios, reservatórios, usinas hidrelétricas e postos fluviométricos, dentre outras informações que foram disponibilizadas em forma digital pela Agência Nacional das Águas (ANA).

O cenário 1 corresponde à modelagem atual da bacia em estudo. Na Figura 4, os nós N2, N7, N9 e N11 são nós de bacia e correspondem aos postos fluviométricos. As séries temporais de vazões observadas foram fornecidas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Os nós de bacia representam pontos de entrada de escoamento es-

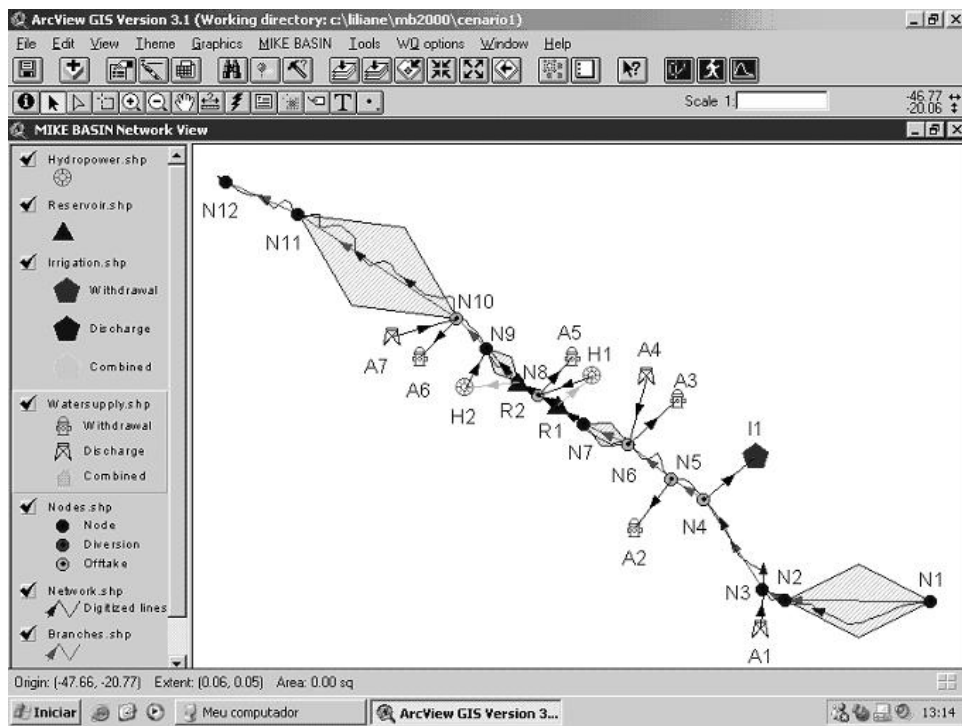


Figura 4 - Rede de fluxo: cenários 1 e 2.

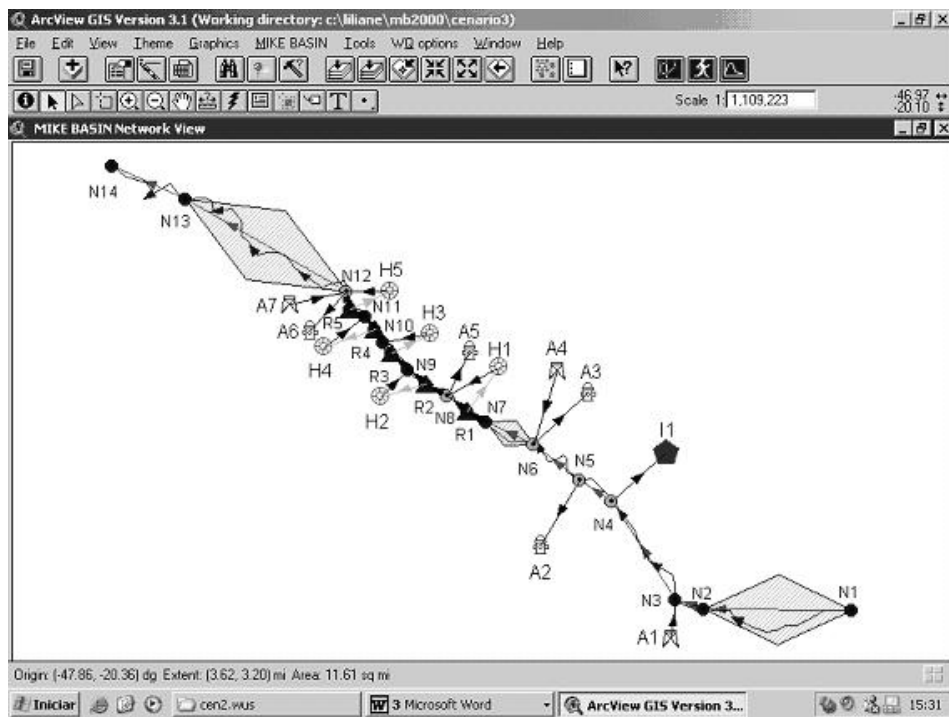


Figura 5 - Rede de fluxo: cenários 3 e 4.

pecífico. A área hachurada representa a área de drenagem de cada nó.

Os demais nós são pontos de captação e lançamento de efluentes. II é um esquema de irrigação, enquanto que os esquemas A2, A3, A5 e A6 são captações para abastecimento urbano e industrial. R1 e R2 são reservatórios correspondentes às PCHs de Dourados (H1) e São Joaquim (H2).

O esquema A1 é um lançamento de esgoto urbano do município de Santo Antônio da Alegria, o qual não possui nenhum tratamento de efluente e emite 294 kg DBO/dia. A4 corresponde aos lançamentos de Patrocínio Paulista, Batatais, Itirapuã e Franca, sendo que apenas as duas últimas tratam seus esgotos. Totalizando, 5752 kg DBO/dia são lançados por esse esquema. Finalmente, A7 representa o lançamento de esgoto urbano de São Joaquim da Barra e Guará, ambos sem tratamento, o que significa carga orgânica de 2727 kg DBO/dia.

O modelo considera que a água é desviada para H1 e H2, fato que não acontece na prática, pois as usinas estão localizadas no eixo do rio e não possuem canal de derivação. Portanto os trechos R1-H1-N8 e R2-H2-N9 são virtuais, com vazões nulas.

Como as usinas trabalham a fio d'água, foi considerado constante o volume dos reservatórios ao longo de todo período de simulação, ou seja, os reservatórios de Dourados e São Joaquim mantiveram seus volumes de 0,035 hm³ e 2,00 hm³, respectivamente. Nesse cenário, as usinas operam 24 horas por dia na sua capacidade instalada, sendo que a PCH Dourados deve gerar 10,8 MW e a PCH São Joaquim, 8,05 MW.

Dados de precipitação e evapotranspiração potencial foram fornecidos pelos arquivos eletrônicos de balanço hídrico do Estado de São Paulo e do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

O intervalo mensal de simulação variou no período de janeiro de 1980 a dezembro de 2003, sendo este período escolhido para todos os cenários subsequentes.

A rede de fluxo do cenário 2 é a mesma do cenário 1. Foi utilizada a hipótese de que as cidades que não possuem tratamento de esgoto começariam a tratar seus efluentes domésticos com 80% de eficiência de remoção da matéria orgânica. Os municípios referidos são: Santo Antônio da Alegria, Patrocínio Paulista, Batatais, São Joaquim da Barra e Guará.

O cenário 3 apresenta a situação futura do rio Sapucaí-Mirim quando as cinco PCHs estiverem operando, como mostra a rede de fluxo da Figura 5. Considerou-se que as PCHs Dourados, São Joaquim,

Palmeiras, Anhangüera e Retiro deverão produzir suas respectivas potências instaladas. Como as cinco usinas trabalham a fio d'água, o volume de cada reservatório permanece constante. Com a instalação de três novas pequenas centrais hidrelétricas, novos conflitos pela utilização da água surgirão e ocorrerão mudanças em sua qualidade.

A rede de fluxo do cenário 4 é a mesma do cenário 3. Nesse cenário foi considerado que os municípios de Santo Antônio da Alegria, Patrocínio Paulista, Batatais, São Joaquim da Barra e Guará implantarão sistema de tratamento de esgoto com 80% de eficiência.

RESULTADOS

No cenário 1, o grau de atendimento das demandas para irrigação e abastecimento doméstico e industrial foi de 100%. Esses resultados indicam que a demanda de água na bacia do rio Sapucaí-Mirim condiz com a disponibilidade hídrica da mesma.

Quanto à geração de energia, a PCH Dourados produziu em 82,5% do período de simulação sua capacidade instalada de 10,8 MW. Essa PCH produziu energia acima de sua capacidade assegurada (7,76 MW) em 69,8% do tempo. Já a PCH São Joaquim gerou, com satisfação de 86,3%, a sua potência instalada (8,05 MW). A energia média gerada durante o período de simulação foi de 6,94 MW, e em 77,8% do tempo de simulação a usina produziu acima da energia assegurada (5,63 MW).

A Figura 6 mostra os resultados de DBO obtidos nos cenários 1 e 2. Para verificar o grau de poluição deste constituinte na água, comparou-se o valor de sua concentração com o valor limite estabelecido pela Resolução CONAMA n° 20, de 18 de junho de 1986, na qual se encontra a classificação das águas e seus níveis de qualidade avaliados por parâmetros e indicadores específicos, de modo a assegurar os usos preponderantes.

No cenário 1, em N3, N4 e N5, as concentrações médias de matéria orgânica, avaliadas em termo de DBO e OD no período simulado foram, respectivamente de 0,7 mg/l e 6,3 mg/l.

Até este último ponto, a qualidade da água está boa e, em todo este trecho, as concentrações das variáveis OD e DBO estiveram dentro do limite para Classe 2. O não enquadramento do rio começou no ponto N6, o qual recebe lançamento de efluentes domésticos de Batatais, Itirapuã, Franca e Patrocínio Paulista.

Tabela 5 - Índices de satisfação média mensal para a geração de energia - cenário 3.

Geração de Energia - Satisfação (%) - cenário 3													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	99,9	100	100	100	98,4	90,9	72,4	49,7	39,3	48,0	71,8	88,9	79,9
H2	100	100	100	100	99,5	95,5	80,9	55,6	42,9	54,0	79,5	92,6	83,4
H3	63,3	79,3	78,6	64,0	41,4	29,6	20,6	13,6	10,6	13,5	21,5	38,4	39,5
H4	95,6	100	100	98,8	90,6	80,4	57,9	39,4	32,2	38,5	58,3	77,7	72,4
H5	28,8	36,6	37,2	26,2	18,2	14,2	10,3	7,3	6,1	7,2	11,0	18,4	18,5

Tabela 6 - Energia gerada em cada esquema - cenário 3.

Energia média gerada (MW) - cenário 3													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	10,8	10,8	10,8	10,8	10,6	9,8	7,8	5,4	4,2	5,2	7,8	9,6	8,6
H2	8,1	8,1	8,1	8,1	8,0	7,7	6,5	4,5	3,5	4,4	6,4	7,5	6,7
H3	8,6	10,8	10,7	8,7	5,6	4,0	2,8	1,9	1,4	1,8	2,9	5,2	5,4
H4	17,7	18,5	18,5	18,3	16,8	14,9	10,7	7,3	6,0	7,1	10,8	14,4	13,4
H5	4,14	5,3	5,4	3,8	2,6	2,1	1,5	1,1	0,9	1,0	1,6	2,7	2,7

O nó N8, ponto de captação para uso urbano, apresentou DBO média, no período simulado, de 10,0 mg/l, enquanto a de OD foi de 6,2 mg/l. DBO esteve superior a 5 mg/l em 68,4% do tempo de simulação.

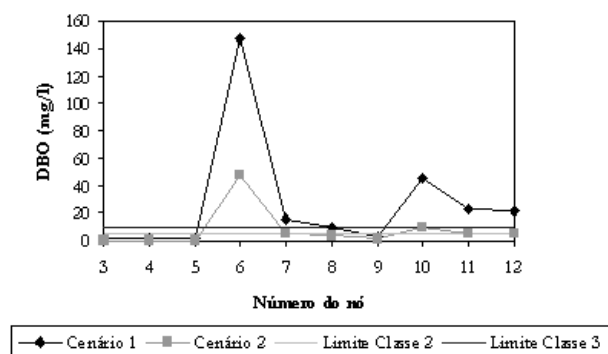


Figura 6 - DBO (mg/l) nos cenários 1 e 2.

O reservatório de São Joaquim auxilia na melhora da qualidade da água. O rio percorre um trecho com suas águas enquadradas na Classe 3 e, após esse reservatório, Classe 2. As concentrações médias de DBO e OD em N9 passa para, respectivamente, 2,8 mg/l e 6,3 mg/l. Em apenas 17,0% do tempo simulado a DBO esteve acima de 5 mg/l e, em 23,3% do tempo, abaixo de 1 mg/l.

Após sutil melhora na qualidade da água, o rio recebe o esgoto doméstico, sem tratamento, de São Joaquim da Barra e Guará (N10) e em N12, confluência do rio Sapucaí-Mirim com o rio Grande, a DBO manteve-se acima de 10 mg/l.

No cenário 2, em 100% do período de simulação, os nós N3, N4 e N5 apresentaram DBO abaixo de 1 mg/l. A DBO dos nós N7 e N8 foi menor que 5 mg/l em, respectivamente, 56,0% e 78,8% do tempo, e em N9 manteve-se abaixo desse valor durante todo o período de simulação. Já N12 apresentou DBO menor que 5 mg/l e 10 mg/l em, respectivamente, 66,0% e 97,9% do tempo. Quanto ao OD, os resultados foram satisfatórios em todos os nós.

Com as cinco PCHs em operação (cenário 3), o grau de atendimento aos esquemas I1, A2, A3, A5 e A6 foi de 100% em todo o período de simulação. A satisfação no atendimento e a energia gerada por cada PCH são mostradas, respectivamente, nas Tabelas 5 e 6.

Quanto à qualidade da água, a Figura 7 apresenta os resultados dos cenários 3 e 4.

Não houve mudança significativa no cenário 3. Nos nós N3, N4 e N5 a DBO esteve abaixo de 1 mg/l em, respectivamente, 78,8%, 79,5% e 79,9% do período de simulação. Em nenhum intervalo a DBO esteve acima de 5 mg/l e a concentração média de OD foi de 6,3 mg/l para os três nós.

Em N8, a DBO foi menor que 5 mg/l em 31,6% do tempo e menor que 10 mg/l em 52,8%. A concentração média de OD foi de 6,22 mg/l. N9

apresentou a DBO inferior a 5 mg/l e 10 mg/l em, respectivamente, 41,7% e 62,5% do período simulado.

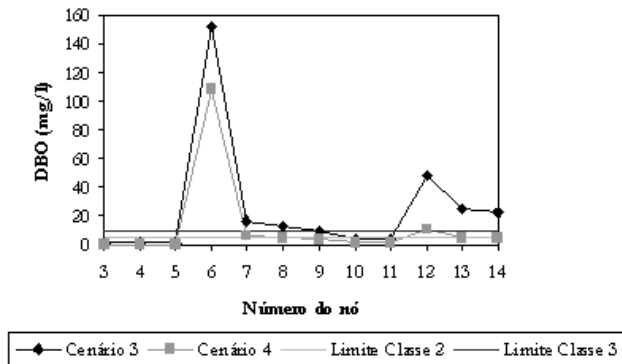


Figura 7 - DBO (mg/l) nos cenários 3 e 4.

A DBO em N10 foi acima de 5 mg/l em 19,8% do tempo e o OD médio encontrado foi de 6,3 mg/l. Já no nó N11 isto ocorreu em 19,4% do tempo. Em N12, a DBO manteve-se acima de 10 mg/l em 48,5% do tempo.

No cenário 4, os nós N3, N4, e N5 apresentaram DBO abaixo de 1 mg/l em todo o período de simulação. A DBO manteve-se abaixo de 5 mg/l nos nós N7, N8, N9, N10, N11 e N14 em, respectivamente, 53,47%, 62,85%, 77,78%, 100%, 100% e 60,07% do tempo. Nos nós N7, N8, N9 e N14, a DBO foi menor que 10 mg/l em 84,72%, 92,36%, 78,47%, 93,40% do tempo, respectivamente.

CONCLUSÕES

De acordo com a avaliação de cenários e simulação computacional, o estudo mostra que as sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí não possuem conflitos pelo uso do recurso hídrico, entretanto a água está se esgotando qualitativamente e medidas de controle e prevenção da poluição dos recursos hídricos devem ser tomadas.

O enquadramento dos trechos do rio Sapucaí-Mirim em Classe 2 ou 3 baseou-se apenas na comparação das concentrações de OD e DBO com os valores limites indicados para cada classe e não deve ser considerado como uma definição de classes de água doce, uma vez que não foram analisados outros parâmetros.

Conforme os resultados apresentados, o rio Sapucaí-Mirim deteriora-se qualitativamente devido principalmente aos lançamentos de esgoto doméstico "in natura". Os reservatórios auxiliam na melhora da qualidade da água, mas há necessidade de implantação de sistemas de tratamento de esgoto.

O modelo MIKE BASIN mostrou-se extremamente versátil e possui interface amigável, uma ótima ferramenta para planejar e gerenciar recursos hídricos. Apesar das simplificações necessárias, decorrentes, entre outros motivos, da falta de dados, o modelo permitiu boa representação do sistema. As características do modelo que mais se destacam são a facilidade de representação dos sistemas hídricos, manipulação dos dados e o curto tempo de processamento das simulações.

Cabe ressaltar que os métodos computacionais não determinam políticas operacionais rígidas, visto que não englobam as diversas variáveis sociais, econômicas e ambientais. No entanto, podem ser utilizados como importante ferramenta auxiliar nos processos decisórios.

REFERÊNCIAS

- ALAYA, A. B.; SOUSSI, A.; TARHOUNI, J.; NCIB, K. (2003). *Optimization of Nebhana Reservoir by Stochastic Dynamic Programming*. Water Resources Management, v. 17, n. 4, p. 259-272, August.
- AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; PORTO, M. (1998). *Sistema de Apoio à Decisão para o Gerenciamento Integrado de Quantidade e Qualidade da água: Metodologia e Estudo de Caso*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.3, n. 1, p. 21-51. Jan/Mar.
- BOWDEN, K.; BROWN, S. R. (1983). *Relating Effluent Control Parameters to River Quality Objectives Using a Generalized Catchment Simulation Model*. Water Science and Technology, v. 16, p. 22-31.
- BRAGA, B. P. F.; YEH, W. W.-G.; BECKER, L.; BARROS, M. T. L. (1991). *Stochastic Optimization of Multiple-Reservoir-System Operation*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 117, n. 4, p. 471-481, July/August.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ-MIRIM/GRANDE (2000). *Relatório Zero: Diagnóstico da Situação Atual dos Recursos Hídricos e Estabelecimentos de Diretrizes Técnicas para a Elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Sapucaí-Mirim/Grande*.
- DROLIC, A.; KONCAN, J. Z. (1999). *Calibration of QUAL2E Model for the Sava River (Slovenia)*. Water Science and Technology, v. 40, n. 10, p. 111-118.

- DYRBAK, L. (2000). *Reservoir Operation Optimization*. Department of Hydrodynamics and Water Resources, Technical University of Denmark, July 2000. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/Publications/index.htm>. (Acessado em 08/09/2003).
- ENGEVIX Engenharia S/C LTDA (2001). *Relatório Final do Projeto Básico: Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Sapucaí*. v. 1 e 2.
- JAIRAJ, P. G.; VEDULA, S. (2000). *Multireservoir System Optimization Using Fuzzy Mathematical Programming*. Water Resources Management, v. 14, n. 6, p. 457-472, December.
- JORGENSEN, B. S. (2002). *A River Rehabilitation Study in Malaysia*. Master's Thesis. Environment and Resources, Department of Hydrodynamics and Water Resources. Technical University of Denmark.
- KJELDSEN, T. R.; ROSBJERG, D. (2001). *A Framework for Assessing the Sustainability of Water Resources System*. Regional Management of Water Resources. Proceedings of a symposium held during the 6th IAHS Scientific Assembly at Maastricht, The Netherlands, July 2001. IAHS Publ. n. 268.
- LEVY, B. S.; BAECHER, G. B. (1999). *NileSim: A Windows-Based Hydrologic Simulator of the Nile River Basin*. Journal of Water resources Planning and Management, v. 125, n. 2, p. 100-106, March/April.
- LIMA, G. (2002). *Aplicação de simulação computacional na análise dos conflitos entre os usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia no Estado de São Paulo*. São Carlos. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ORLOB, G. T., ed. (1984). *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*. Wiley-Interscience, 518 p.
- ORLOB, G. T. (1992). *Water-Quality Modeling for Decision Making*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 118, n. 3, p. 295-307, May/June.
- PEIXOTO, L. S. (2002). *A utilização de simulação computacional no gerenciamento de usos múltiplos da água na Bacia do Sapucaí-Grande no Estado de São Paulo*. São Carlos. 130p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- REIS, L. F. R.; AKUTSU, J. (2002). *Estratégias operacionais para sistemas de reservatórios via algoritmo genético*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 7, n. 3.
- RITSCHARD, R. L.; CRUISE, J. F.; HATCH, L. U. (1999). *Spatial and Temporal Analysis of Agricultural Water Requirements in the Gulf Coast of the United States*. Journal of the American Water Resources Association, v. 35, n. 6, p. 1585-1596, December.
- STORM, B. (1999). *Cape Fear River Basin Modeling Project*. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/Publications/index.htm>. (Acessado em 08/09/2003).
- SYLLA, C. (1995). *A Penalty-Based Optimization for Reservoirs System Management*. Computers & Industrial Engineering, v. 28, n. 2, p. 409-422, April.
- THOMANN, R. V. (1963). *Mathematical Model for Dissolved Oxygen*. Journal of Sanitary Engineering Division, v. 89, n. 5, p. 1-30.
- TUNG, C. P.; HSU, S. Y.; LIU C. M.; LI J. S. (2003). *Application of the Genetic Algorithm for Optimizing Operation Rules of the LiYuTan Reservoir in Taiwan*. Journal of the American Water Resources Association, v. 39, n. 3, p. 649-657, June.
- WANG, C. G.; JAMIESON, D. G. (2002). *An Objective Approach to Regional Wastewater Treatment Planning*. Water Resources Research, v. 38, n. 3, p. 4-1 - 4-8, March.
- YEN, J. H.; CHEN, C. Y. (2001). *Allocation Strategy Analysis of Water Resources in South Taiwan*. Water Resources Management, v. 15, n. 5, p. 283-297, October.

Computational Simulation Use for Planning of a Water Resource System: Qualitative and Quantitative Case Study

ABSTRACT

Competition for water has grown in the same proportion that it is becoming scarce, as a consequence of waste, unequal distribution, increase and variety of consumption and water quality degradation. Due to this situation, the present study assessed the quantity and quality of water available in the Sapucaí-Mirim River Basin, SP. Through river basin modeling, application of a simulation model and implementing scenarios of domestic organic load emission reduction, the water resources system performance, conflict between the multiple water uses and the concentration of DO and BOD parameters in the river water that receives often untreated domestic effluents are analyzed. Although the quantity of water is enough to cover demand, the study shows that electric power generation is compromised and that water has become scarce in terms of quality, showing that it is urgently necessary to construct new wastewater treatment plants.

Key-words: water resources, simulation, water quality.