Liliane Lazzari Albertin

AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE E QUALIDADE DOS RECURSOS
HÍDRICOS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
SAPUCAÍ-MIRIM (SP) ATRAVÉS DO SIMULADOR
COMPUTACIONAL MIKE BASIN

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, como parte dos requisitos
para a obtenção do Título de Mestre em
Ciências da Engenharia Ambiental

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos

2004

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço...20.../12.../04...

Ass.: [Signature]

DEDALUS - Acervo - EESC

31100050085

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **LILIANE LAZZARI ALBERTIN**

Dissertação defendida e julgada em 08-07-2004 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **FREDERICO FÁBIO MAUAD (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada

Prof. Dr. **JOSÉ NILSON BEZERRA CAMPOS**
(Universidade Federal do Ceará/UFC)

APROVADA

Prof. Dr. **LUIZ ANTONIO DANIEL**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Associado **EVALDO LUIZ GAETA ESPINDOLA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Ciências da Engenharia Ambiental

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho à minha mãe,
Maria Gertrudes, exemplo de
amor, luta e dedicação para que eu
chegasse aqui.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo seu amor, dons concedidos e providência.

Ao meu orientador, amigo e formador, Dr. Frederico Fábio Mauad, pela confiança, dedicação e exemplo, a quem também dedico este trabalho.

Aos queridos professores Dr. Fazal Hussein Chaudry e Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis, pela colaboração e aprendizado obtido.

Aos meus pais, Maria Gertrudes e José Carlos, e ao meu irmão José Carlos, pela oportunidade, confiança e amor.

Ao Rogers Caparroz, pela compreensão, amor e companheirismo.

Aos queridos amigos Ana Rosa de Aguiar Barbosa, Antônio de Pádua Scott Alves Ferreira, Carlos Roberto Ruchiga Corrêa Filho, Hugo Rocha de Oliveira, Luciana Silva Peixoto pela companhia, amizade, incentivo e toda ajuda prestada.

Ao pessoal do Laboratório de Simulação Numérica: Adelena, José Eduardo, Peter, Kleber, Alexandre e Fernando pela companhia no trabalho e por toda troca de experiências.

Aos divertidíssimos e queridos Beto e Miro, por toda ajuda quando fizemos o trabalho em campo e por toda a experiência fornecida por eles sobre a realidade no campo.

Aos amigos e funcionários do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada e do Departamento de Hidráulica e Saneamento.

À CETESB, Agência Ambiental de Franca, em especial, José Roberto Setti e Maria Aparecida Baldochi, pela atenção e dados concedidos.

Ao Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande, pelos dados concedidos.

Ao CNPq e ao Fundo Setorial de Recursos Hídricos, pela bolsa concedida.

À FINEP pelo auxílio à pesquisa.

“...³ O homem foi para o oriente com uma corda na mão: mediu mil côvados;
 a seguir fez-me passar na água, que me chegou até os tornozelos. Mediu ainda mil côvados
 e me fez atravessar a água, que me subiu até os joelhos.⁴ Mediu de novo mil côvados e
 fez-me atravessar a água, que me subiu até os quadris.⁵ Mediu, enfim, mil côvados;
 e era uma torrente que eu não podia atravessar, de tal modo as águas tinham crescido!
 E era preciso nadar, era um curso de água que não se podia passar a vau.⁶ ‘Viste, filho do
 homem?’ – falou-me, e me levou ao outro lado da torrente.⁷ Ora, retornando, avistei nas duas
 margens da torrente uma grande quantidade de árvores.⁸ ‘Essas águas, disse-me ele, dirigem-
 se para a parte oriental, elas descem à planície do Jordão; elas se lançarão no mar,
 de sorte que suas águas se tornarão mais saudáveis.⁹ Em toda parte aonde chegar a corrente,
 todo animal que se move na água poderá viver, e haverá lá grande quantidade de peixes.
 Tudo o que essa água atingir se tornará são e saudável e em toda parte aonde chegar a
 torrente haverá vida.¹⁰ Na praia desse mar estarão pescadores; eles estenderão suas redes
 desde Engadi até Engalim, e haverá aí peixes de toda espécie em abundância, como no grande
 mar.¹¹ Mas seus mangues e charcos não serão saneados, abandonados que estão ao sal.¹² Ao
 longo da torrente, em cada uma de suas margens, crescerão árvores frutíferas de toda espécie,
 e sua folhagem não murchará, e não cessarão jamais de dar frutos: todos os meses frutos
 novos, porque essas águas vêm do santuário. Seus frutos serão comestíveis e suas folhas
 servirão de remédio.’...”

(Ez 47, 3-12)

RESUMO

ALBERTIN, L. L. (2004). Avaliação da Quantidade e Qualidade dos Recursos Hídricos Superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí-Mirim (SP) Através do Simulador Computacional Mike Basin. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Fundamental a vida e ao desenvolvimento de qualquer sociedade, a água é um bem precioso e limitado que está se esgotando e sendo motivo de preocupação mundial. O desperdício, a distribuição desigual, o aumento do consumo e a degradação da qualidade da água são motivos que a tornaram escassa e trouxeram à tona a importância do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Frente a esta situação, este trabalho buscou avaliar a disponibilidade hídrica quantitativa e qualitativa da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim, SP. Através da aplicação do simulador hidrológico MIKE BASIN, foi analisado o desempenho do sistema de recursos hídricos, o conflito existente entre os usos múltiplos e a concentração dos parâmetros OD e DBO 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: recursos hídricos, simulação computacional, qualidade da água, usos múltiplos

ABSTRACT

ALBERTIN, L. L. (2004). Assessment of Superficial Water Resources Quantity and Quality of Sapucaí-Mirim River Basin (SP) Through Computational Simulator Mike Basin. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Fundamental to the life and to development of any society, water is a precious and limited possession which is running out and has become a world concern. It's waste, unequal distribution, increase in the consumption, and degradation of water quality are reasons that have made the water become scarce and bring up the importance of water resources planning and management. Motivate by this situation, this work assessed the quantity and quality of water available at Sapucaí-Mirim River Basin, SP. Through of the application of the MIKE BASIN hydraulic simulator, water resources system performance was analyzed, the conflict between the multiples uses of water and the concentration of DO and BOD parameters in the river water that receives domestic wastewater, many of them untreated. Although the quantity water is enough to serve the demand, the study shows that electric power generation is compromising and the water has been scarcity in terms of quality, evidence that it is necessary and urgent to construct new wastewater treatment plants.

Key-words: water resources, computational simulation, water quality, multiples uses

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Localização da UGRHI no Estado de São Paulo	27
Figura 4.2: Principais sub-bacias que compõem a UGRHI Sapucaí-Mirim/Grande	27
Figura 4.3: Municípios paulistas com área na UGRHI	29
Figura 4.4: Localização dos aproveitamentos hidrelétricos	43
Figura 5.1: Conceito do modelo MIKE BASIN	52
Figura 5.2: Exemplo do editor de séries históricas TSEdit	52
Figura 5.3: Dados gerais de entrada para os reservatórios	55
Figura 5.4: Entrada de séries temporais referentes aos reservatórios	56
Figura 5.5: Armazenamentos físicos da opção “Allocation Pool Reservoir”	57
Figura 5.6: Zonas de armazenamento dos reservatórios	59
Figura 5.7: Entrada dos dados de precipitação (mm/dia) no TSEdit	60
Figura 5.8: Entrada de dados de consumo de água na irrigação	61
Figura 5.9: Componentes do ciclo aeróbio do nitrogênio	64
Figura 5.10: Reações sequenciais de nitrificação com o aumento da distância do ponto de lançamento de amônia	65
Figura 5.11: Declaração dos parâmetros de qualidade da água	67
Figura 5.12: Definição dos tipos de tratamento de efluentes	68
Figura 5.13: Localização dos postos fluviométricos no curso do rio Sapucaí-Mirim	71
Figura 5.14: Relação linear entre as vazões médias dos postos Pioneiros e Santo Antônio da Alegria	72
Figura 5.15: Relação linear entre as vazões médias dos postos Pioneiros e Usina Dourados	73
Figura 5.16: Relação linear entre as vazões médias dos postos Pioneiros e Fazenda São Domingos	73
Figura 5.17: Relação linear entre as vazões mínimas dos postos Pioneiros e Santo Antônio da Alegria	74
Figura 5.18: Relação linear entre as vazões mínimas dos postos Pioneiros e Usina Dourados	74
Figura 5.19: Relação linear entre as vazões mínimas dos postos Pioneiros e Fazenda São Domingos	75
Figura 6.1: Cenário 1 – Situação atual	88
Figura 6.2: Rede de Fluxo	88
Figura 6.3: Declaração dos parâmetros do modelo de qualidade da água	91

Figura 6.4: Declaração do tipo de tratamento e da carga orgânica residual	92
Figura 6.5: Cenário planejado	95
Figura 6.6: Rede de fluxo do cenário planejado	95
Figura 7.1: Comparação das séries de vazões observadas e geradas do posto Santo Antônio da Alegria	100
Figura 7.2: Comparação das séries de vazões observadas e geradas do posto Usina Dourados	100
Figura 7.3: Comparação das séries de vazões observadas e geradas do posto Pioneiros	101
Figura 7.4: Comparação das séries de vazões observadas e geradas do posto Fazenda São Domingos	101
Figura 7.5: Histograma dos ruídos brancos de $Z_1(t)$	102
Figura 7.6: Histograma dos ruídos brancos de $Z_2(t)$	103
Figura 7.7: Histograma dos ruídos brancos de $Z_3(t)$	103
Figura 7.8: Histograma dos ruídos brancos de $Z_4(t)$	104
Figura 7.9: Comparação das séries de vazões mínimas observadas e geradas do posto Santo Antônio da Alegria	105
Figura 7.10: Comparação das séries de vazões mínimas observadas e geradas do posto Usina Dourados	106
Figura 7.11: Comparação das séries de vazões mínimas observadas e geradas do posto Pioneiros	106
Figura 7.12: Comparação das séries de vazões mínimas observadas e geradas do posto Fazenda São Domingos	107
Figura 7.13: Histograma dos ruídos brancos de $Z_1(t)$ (vazões mínimas)	108
Figura 7.14: Histograma dos ruídos brancos de $Z_2(t)$ (vazões mínimas)	108
Figura 7.15: Histograma dos ruídos brancos de $Z_3(t)$ (vazões mínimas)	109
Figura 7.16: Histograma dos ruídos brancos de $Z_4(t)$ (vazões mínimas)	109
Figura 7.17: Satisfação e déficit no atendimento de I1 – Cenário 1	110
Figura 7.18: Satisfação e déficit no atendimento de A2 – Cenário 1	111
Figura 7.19: Satisfação e déficit no atendimento de A3 – Cenário 1	112
Figura 7.20: Satisfação e déficit no atendimento de A5 – Cenário 1	112
Figura 7.21: Satisfação e déficit no atendimento de A6 – Cenário 1	113
Figura 7.22: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H1 – Cenário 1	114
Figura 7.23: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H2 – Cenário 1	116
Figura 7.24: Concentração de OD e DBO no nó N3 – Cenário 1	117
Figura 7.25: Concentração de OD e DBO no nó N4 – Cenário 1	118

Figura 7.26: Concentração de OD e DBO no nó N5 – Cenário 1	119
Figura 7.27: Concentração de OD e DBO no nó N6 – Cenário 1	120
Figura 7.28: Concentração de OD e DBO no nó N8 – Cenário 1	121
Figura 7.29: Concentração de OD e DBO no nó N9 – Cenário 1	122
Figura 7.30: Concentração de OD e DBO no nó N10 – Cenário 1	123
Figura 7.31: Concentração de OD e DBO no nó N12 – Cenário 1	124
Figura 7.32: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H1 – Cenário 2	125
Figura 7.33: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H2 – Cenário 2	127
Figura 7.34: Concentração de OD e DBO no nó N8 – Cenário 2	128
Figura 7.35: Concentração de OD e DBO no nó N9 – Cenário 2	129
Figura 7.36: Concentração de OD e DBO no nó N10 – Cenário 2	130
Figura 7.37: Concentração de OD e DBO no nó N12 – Cenário 2	131
Figura 7.38: Satisfação e déficit no atendimento de I1 – Cenário 3	132
Figura 7.39: Satisfação e déficit no atendimento de A2 – Cenário 3	133
Figura 7.40: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H1 – Cenário 3	134
Figura 7.41: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H2 – Cenário 3	135
Figura 7.42: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H3 – Cenário 6	140
Figura 7.43: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H4 – Cenário 6	141
Figura 7.44: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H5 – Cenário 6	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Características dos tipos de rochas da Bacia do Paraná presentes no nordeste do Estado de São Paulo	31
Tabela 4.2: Temperaturas médias mensais	34
Tabela 4.3: Precipitação média mensal	35
Tabela 4.4: População total da UGRHI Sapucaí-Mirim/Grande	37
Tabela 4.5: Disponibilidade hídrica superficial mínima ($Q_{7,10}$) por sub-bacia	38
Tabela 4.6: Porcentagem de captação de água para abastecimento urbano	39
Tabela 4.7: Captações superficiais cadastradas para abastecimento urbano nos municípios	40
Tabela 4.8: Captações superficiais cadastradas para abastecimento industrial nos municípios	41
Tabela 4.9: Usinas hidrelétricas instaladas na Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande	42
Tabela 4.10: Dados das PCH's instaladas e em fase de implantação do rio Sapucaí-Mirim	43
Tabela 4.11: Vazões superficiais captadas para aquícultura	44
Tabela 4.12: Disponibilidade e demandas estimadas para a UGRHI e sub-bacias	45
Tabela 4.13: Pontos de lançamento de carga orgânica doméstica por município	46
Tabela 4.14: Carga orgânica (potencial e remanescente) por ano de atividade	49
Tabela 5.1: Relação dos postos fluviométricos (sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí)	70
Tabela 5.2: Falha nos postos fluviométricos no período de 1945 a 1970	72
Tabela 5.3: Regressões lineares dos vários postos fluviométricos com relação a Pioneiros	75
Tabela 5.4: Sub-bacias e municípios com respectivas áreas totais	76
Tabela 5.5: Captação superficial para abastecimento urbano das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí	78
Tabela 5.6: Captação superficial para abastecimento industrial das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí	78
Tabela 5.7: Dados principais da PCH Dourados	79
Tabela 5.8: Dados principais da PCH São Joaquim	80
Tabela 5.9: Dados principais das PCH's Palmeiras, Anhangüera e Retiro	80
Tabela 5.10: Relação dos municípios que lançam efluentes domésticos no rio	81

Sapucaí-Mirim e seus respectivos sistemas de tratamento

Tabela 5.11: Carga orgânica potencial e remanescente lançada por município	81
Tabela 6.1: Descrição da rede de fluxo	89
Tabela 6.2: Descrição da rede de fluxo do cenário planejado	96
Tabela 7.1: Análise estatística dos ruídos brancos das séries $Z_1(t)$, $Z_2(t)$, $Z_3(t)$ e $Z_4(t)$	102
Tabela 7.2: Análise estatística dos ruídos brancos das séries desazonalizadas de vazões mínimas mensais	107
Tabela 7.3: Índice de satisfação média mensal para o esquema I1 – Cenário 1	110
Tabela 7.4: Índices de satisfação média mensal para os esquemas A2, A3, A5 e A6 – Cenário 1	111
Tabela 7.5: Índice de satisfação média mensal para o esquema H1 – Cenário 1	114
Tabela 7.6: Energia gerada em H1 – Cenário 1	114
Tabela 7.7: Déficit médio mensal de H1 – Cenário 1	115
Tabela 7.8: Vazão média mensal liberada por R1 para H1 e N8 – Cenário 1	115
Tabela 7.9: Índice de satisfação média mensal para o esquema H2 – Cenário 1	116
Tabela 7.10: Energia gerada em H2 – Cenário 1	116
Tabela 7.11: Déficit médio mensal de H2 – Cenário 1	116
Tabela 7.12: Vazão média mensal liberada por R2 para H2 e N9 – Cenário 1	117
Tabela 7.13: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N3 – Cenário 1	118
Tabela 7.14: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N4 – Cenário 1	119
Tabela 7.15: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N5 – Cenário 1	119
Tabela 7.16: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N6 – Cenário 1	120
Tabela 7.17: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N8 – Cenário 1	121
Tabela 7.18: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N9 – Cenário 1	122
Tabela 7.19: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N10 – Cenário 1	123
Tabela 7.20: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N12 – Cenário 1	124
Tabela 7.21: Índices de satisfação média mensal – Cenário 2	125

Tabela 7.22: Índice de satisfação média mensal para o esquema H1 – Cenário 2	126
Tabela 7.23: Energia gerada em H1 – Cenário 2	126
Tabela 7.24: Déficit médio mensal de H1 – Cenário 2	126
Tabela 7.25: Vazão média mensal liberada por R1 para H1 e N8 – Cenário 2	126
Tabela 7.26: Índice de satisfação média mensal para o esquema H2 – Cenário 2	127
Tabela 7.27: Energia gerada em H2 – Cenário 2	127
Tabela 7.28: Déficit médio mensal de H2 – Cenário 2	127
Tabela 7.29: Vazão média mensal liberada por R2 para H2 e N9 – Cenário 2	128
Tabela 7.30: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N8 – Cenário 2	129
Tabela 7.31: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N9 – Cenário 2	129
Tabela 7.32: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N10 – Cenário 2	130
Tabela 7.33: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N12 – Cenário 2	131
Tabela 7.34: Índices de satisfação média mensal – Cenário 3	133
Tabela 7.35: Índice de satisfação média mensal para o esquema H1 – Cenário 3	134
Tabela 7.36: Energia gerada em H1 – Cenário 3	134
Tabela 7.37: Déficit médio mensal de H1 – Cenário 3	135
Tabela 7.38: Índice de satisfação média mensal para o esquema H2 – Cenário 3	135
Tabela 7.39: Energia gerada em H2 – Cenário 3	136
Tabela 7.40: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l – Cenário 3	136
Tabela 7.41: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 4	137
Tabela 7.42: Concentrações médias mensais de OD, em mg/l – Cenário 4	137
Tabela 7.43: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 5	138
Tabela 7.44: Concentrações médias mensais de OD, em mg/l – Cenário 5	139
Tabela 7.45: Índices de satisfação média mensal para a geração de energia – Cenário 6	140
Tabela 7.46: Energia gerada em cada esquema – Cenário 6	140
Tabela 7.47: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 6	142
Tabela 7.48: Índices de satisfação média mensal – Cenário 7	143
Tabela 7.49: Energia média gerada – Cenário 7	143
Tabela 7.50: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 7	144
Tabela 7.51: Concentrações médias mensais de OD, em mg/l – Cenário 7	144
Tabela 7.52: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 8	145

Tabela 7.53: Concentrações médias mensais de OD, em mg/l – Cenário 8

145

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1. Modelos de Otimização	8
3.2. Modelos de Simulação	11
3.3. Modelos de Simulação Combinados com Otimização	14
3.4. Sistemas de Suporte à Decisão (SSD)	16
3.5. Modelos de Qualidade da Água	17
3.6. Considerações Finais sobre os Modelos	23
4. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ-MIRIM/GRANDE	26
4.1. Localização e Aspectos Gerais	26
4.2. Geologia	29
4.3. Geomorfologia	31
4.4. Pedologia	32
4.5. Hidrometeorologia	33
4.6. Sócio-Economia	35
4.7. Disponibilidade Hídrica	37
4.8. Uso dos Recursos Hídricos	38
4.8.1. Abastecimento Urbano e Industrial	38
4.8.2. Irrigação	41
4.8.3. Usinas Hidrelétricas	42
4.8.4. Aquicultura	44
4.9. Balanço Hídrico	44
4.10. Fontes de Poluição	45
4.10.1. Fontes Pontuais ou Fixas	45

4.10.2. Fontes Difusas	50
5. METODOLOGIA	51
5.1. Modelo Computacional MIKE BASIN	51
5.1.1. Rios	53
5.1.2. Reservatórios	55
5.1.3. Irrigação	60
5.1.4. Abastecimento Urbano e Industrial	62
5.1.5. Usinas Hidrelétricas	62
5.1.6. Água Subterrânea	63
5.1.7. Qualidade da Água	63
5.2. Levantamento de Dados	69
5.2.1. Dados Fluviométricos	70
5.2.1.1. Preenchimento de Falhas	71
5.2.2. Usos e Demanda dos Recursos Hídricos	76
5.2.2.1. Abastecimento Urbano e Industrial	77
5.2.2.2. Irrigação	78
5.2.2.3. Geração de Energia Elétrica	79
5.2.3. Lançamento de Efluentes Domésticos e Industriais	80
5.3. Modelagem de Séries Temporais	82
5.3.1. Modelo Estacionário Multivariado Autoregressivo de Primeira Ordem AR(1)	82
6. MODELAGEM DAS SUB-BACIAS DO ALTO, MÉDIO E BAIXO SAPUCAÍ	87
6.1. Avaliação de Cenários	87
7. RESULTADOS	98
7.1. Geração de Séries Temporais de Vazões	98
7.1.1. Parâmetros do Modelo AR(1) para as Séries de Vazões Médias Mensais	98
7.1.2. Geração das Séries de Vazões Médias Mensais	99
7.1.3. Análise dos Resíduos das Séries Sintéticas de Vazões Médias Mensais	102

7.1.4. Parâmetros do Modelo AR(1) para as Séries de Vazões Mínimas Mensais	104
7.1.5. Geração das Séries de Vazões Mínimas Mensais	105
7.1.6. Análise dos Resíduos das Séries Sintéticas de Vazões Mínimas Mensais	107
7.2. Simulação do Cenário 1	110
7.3. Simulação do Cenário 2	124
7.4. Simulação do Cenário 3	132
7.5. Simulação do Cenário 4	136
7.6. Simulação do Cenário 5	138
7.7. Simulação do Cenário 6	139
7.8. Simulação do Cenário 7	142
7.9. Simulação do Cenário 8	144
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	146
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
10. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	160

1. INTRODUÇÃO

Falar de escassez de água em um planeta que tem 70% de sua superfície cobertos por ela pode parecer um contra-senso. No entanto, a maior parte desse volume, aproximadamente 97,5%, encontra-se nos mares e oceanos. Trata-se, portanto, de água salgada, imprópria para o consumo humano e para a produção de alimentos. E os 2,5% restantes de água doce também não estão inteiramente disponíveis para o uso: a maior parte dela (68,9%) encontra-se nas calotas polares e geleiras, 29,9% constituem as águas subterrâneas e 0,9% são relativas à umidade dos solos e pântanos. A água dos rios e lagos representa apenas 0,3% do total de água doce do planeta.

Somente vinte e três países detêm dois terços das reservas de água potável. Cerca de 47% dos recursos hídricos do planeta estão na América do Sul e, desse total, mais da metade (53%) estão no Brasil.

Estima-se que, atualmente, mais de 1 bilhão de pessoas vivem em condições insuficientes de disponibilidade de água para consumo e que, em 25 anos, cerca de 5,5 bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas com moderada ou séria falta de água. Quando se analisa o problema de maneira global, observa-se que existe quantidade de água suficiente para o atendimento de toda a população. No entanto, a distribuição não uniforme dos recursos hídricos e da população sobre o planeta acaba por gerar cenários adversos quanto à disponibilidade hídrica em diferentes regiões.

O Brasil possui situação privilegiada em relação à sua disponibilidade hídrica, porém, cerca de 70% da água doce do país encontra-se na região amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. A ideia de abundância serviu durante muito tempo como suporte à cultura do desperdício da água disponível, à sua pouca valorização como recurso e ao adiamento dos investimentos necessários à otimização de seu uso.

Os problemas de escassez hídrica no Brasil decorrem, fundamentalmente, da combinação entre o crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas. Esse quadro é consequência dos desordenados processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola.

A água é utilizada para atender principalmente às seguintes atividades: geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, irrigação, navegação, recreação, aquicultura, piscicultura, pesca, assimilação e afastamento de esgoto.

O uso múltiplo da água é uma situação natural e uma consequência do desenvolvimento econômico. Atender à demanda de água para os diversos usos em quantidade e qualidade adequadas é considerado um dos maiores desafios do novo milênio. A integração harmônica desses usos é a alternativa existente para a solução de conflitos entre usuários.

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.

Neste trabalho foi aplicado o simulador computacional MIKE BASIN, desenvolvido pela empresa dinamarquesa DHI Water & Environment, como uma ferramenta de auxílio no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim, localizada no extremo norte do Estado de São Paulo. Esta região é muito irrigada 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. Segundo o Relatório Final do Projeto Básico (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 das duas usinas em operação, PCH Dourados e PCH São Joaquim, de propriedade da CPFL, ambas consideradas de fio d'água. Em 1998, foi outorgada a CPFL a autorização para continuação dos estudos dos aproveitamentos do referido rio. Após análises, a CPFL considerou viável a implantação de mais três usinas que estão em projeto básico: PCH Palmeiras, PCH Anhangüera, PCH Retiro.

O modelo matemático MIKE BASIN, que associa técnicas de otimização, simulação e modelagem em rede de fluxo foi utilizado para avaliar diversos cenários. O modelo representa matematicamente uma bacia hidrográfica e é estruturado em uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente do ArcView do Sistema de Informações Geográficas. A simulação dos parâmetros 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.

Os principais objetivos desta pesquisa foram:

- analisar os conflitos entre os usos múltiplos da água, especificamente entre abastecimento urbano e industrial, irrigação e geração de energia elétrica nas sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí;
- simular a evolução das concentrações das variáveis DBO e OD no curso do rio Sapucaí-Mirim causada pelo lançamento de esgoto doméstico e industrial;
- analisar as mudanças ocorridas em termos de disponibilidade hídrica e qualidade da água após a implantação das PCHs Palmeiras, Anhangüera e Retiro;
- verificar 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;
- analisar e verificar a capacidade do modelo escolhido na representação e simulação de sistemas hídricos.

2. CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA

A quantidade e a natureza dos constituintes presentes na água variam principalmente conforme a natureza do solo de onde são originárias, das condições climáticas e do grau de poluição que lhes é conferido, especialmente pelos despejos municipais e industriais.

Uma análise completa de uma água natural indicaria a presença de diversos constituintes nela dissolvidos ou em suspensão. Esses elementos, em geral, são sólidos dissolvidos ionizados, gases, compostos orgânicos, matéria em suspensão, incluindo microrganismos e matéria coloidal.

Durante o ciclo hidrológico, a água sofre alterações em sua qualidade. Isso ocorre nas condições naturais e quando influenciada devido ao uso para suprimento das demandas urbanas, industriais, agrícolas e das alterações do solo, urbano e rural.

Os recursos hídricos têm capacidade de diluir e assimilar esgotos e resíduos mediante processos físicos, químicos e biológicos, que proporcionam a sua autodepuração. Entretanto, essa capacidade é limitada em face da quantidade e da qualidade da água existente. Este recurso também pode servir, ainda, de veículo para a transmissão de doenças, principalmente quando recebe lançamento de esgotos sanitários não tratados, constituindo sério risco à saúde pública.

As diferentes formas que os poluentes chegam à água fazem com que se torne difícil a análise sistemática de todos eles. Por isso, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB faz uso de 43 indicadores de qualidade de água, considerando os mais representativos, que estão divididos em parâmetros físicos, químicos, microbiológicos, hidrobiológicos e ecotoxicológicos (Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo, 2001).

Com o intuito de facilitar a interpretação das informações de qualidade de água de forma abrangente e útil, opta-se pela utilização do Índice de Qualidade das Águas (IQA). Este índice vem sendo utilizado para avaliar a qualidade das águas mesmo apresentando algumas limitações (contempla somente 9 parâmetros) e avalia a utilização dos recursos hídricos para o

abastecimento público. Os parâmetros avaliados pelo IQA são: temperatura, pH, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total (amônia, nitrato, nitrito e nitrogênio orgânico), fósforo total, resíduos totais, turbidez e coliformes.

Neste trabalho, a análise da qualidade das águas superficiais foi realizada através da comparação dos valores limites dos parâmetros OD e DBO segundo a atual classificação dos corpos d'água.

A classificação para as águas doces, bem como para as águas salobras e salinas do Território Nacional é estabelecida pela Resolução nº 20, de 18 de junho de 1986, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Nesta resolução considera-se que: o nível de qualidade da água é avaliado por parâmetros e indicadores específicos, de modo a assegurar seus usos preponderantes; os custos do controle de poluição podem ser mais adequados quando os níveis de qualidade exigidos estão de acordo com os usos que se pretende dar para um determinado corpo d'água ou seus diferentes trechos; o enquadramento dos corpos d'água deve estar baseado não necessariamente no seu estado atual, mas nos níveis de qualidade que deveriam possuir para atender às necessidades da comunidade; a saúde e o bem-estar humano, bem como o equilíbrio ecológico aquático, não devem ser afetados como consequência da deterioração da qualidade das águas.

As águas doces são divididas em quatro classes, a saber:

- Classe Especial: suas águas são destinadas ao abastecimento doméstico sem prévia ou com simples desinfecção e à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
- Classe 1: suas águas são destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento simplificado; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário; à irrigação de hortaliças e frutas; à criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana. Para esta Classe, dentre outros parâmetros especificados, a concentração de DBO_5 a 20 °C não deve ser superior a 3 mg/l O_2 e a de OD não deve ser inferior a 6 mg/l O_2 .
- Classe 2: suas águas são destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário; à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas; à criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana. Os limites dos parâmetros DBO_5 a 20 °C e OD para esta Classe são, respectivamente, até 5 mg/l O_2 e não inferior a 5 mg/l O_2 .

- Classe 3: suas águas são destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; à dessedentação de animais. São vários parâmetros analisados e seus limites estabelecidos para esta Classe, sendo que a DBO_5 a 20°C deve ser inferior a 10 mg/l O_2 e o OD não deve ser inferior a 4 mg/l O_2 .
- Classe 4: suas águas são destinadas à navegação; à harmonia paisagística e aos usos menos exigentes. Para esta Classe a concentração de OD deve ser superior a 2 mg/l O_2 .

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante os últimos 40 anos, um dos mais importantes avanços feitos no campo da engenharia dos recursos hídricos foi o desenvolvimento e adoção de técnicas computacionais para projeto, planejamento e gerenciamento dos complexos sistemas desta área. A análise de sistemas de usos múltiplos da água pode envolver diversas variáveis de decisão e restrições, e quando estas necessitam ser determinadas, são utilizadas técnicas de pesquisa operacional (YEH, 1985).

Atualmente, os avanços na tecnologia da computação, aliados ao aumento de complexidade nos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, têm estimulado a prática de modelos matemáticos e simuladores computacionais como ferramentas para auxiliar nas tomadas de decisão. A escolha do método depende das características do sistema que está sendo considerado, avaliação de dados e principalmente das restrições e objetivos especificados. Restrições típicas incluem equações de continuidade, capacidade de armazenamento mínimo e máximo, quantidade de água liberada, limitações técnicas de equipamentos e obrigações legais e institucionais.

Na década de 60, o processamento de dados foi a principal aplicação de computadores no gerenciamento de recursos hídricos. Como exemplo tem-se o processamento de dados hidrológicos. Mais tarde, com a complexidade dos problemas de armazenamento dos reservatórios e problemas hidráulicos, a técnica da computação começou a ser utilizada para solucionar e simular modelos hidrológicos para determinação de vazões superficiais e otimização de usinas hidrelétricas (VOTRUBA et al., 1988).

Hoje em dia, os sistemas de suporte à decisão são os métodos computacionais mais indicados para a gestão de recursos hídricos. Através deles, pode-se interpretar resultados, gráficos ou outros meios para que sejam feitos gerenciamento e planejamento corretos. A maioria destes sistemas é auxiliada principalmente por: gerenciadores de informação, como o sistema de informação geográfica; ferramentas analíticas, como os modelos matemáticos e

rotinas estatísticas; interfaces gráficas, que facilitam a interpretação dos dados para o usuário (ORLOB, 1992).

A seguir serão apresentados os principais métodos utilizados para planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Eles se dividem em simulação e otimização.

Derivada do radical ótimo, do latim *optimu*, otimização é palavra que tem como conceito o conjunto das técnicas algorítmicas e de programação usadas para buscar o valor ótimo de funções matemáticas. A tarefa da otimização é minimizar ou maximizar a função objetivo, que se pretende otimizar, encontrando soluções para as variáveis de decisão. Por categoria os métodos de otimização se dividem em: programação linear, programação não linear (irrestritos ou não) e programação dinâmica.

Programação linear é o método mais simples e amplamente utilizado em pesquisas operacionais. Como o próprio nome diz, essa técnica é um caso particular do modelo geral de otimização quando o conjunto de restrições e a função objetivo são lineares.

Programação dinâmica é muito poderosa e também muito conhecida em pesquisas operacionais. Em muitas situações, o problema de otimização em recursos hídricos é dado por uma sequência de decisões que evoluem no tempo ou no espaço. Qualquer sistema desta natureza pode ser tratado através da programação dinâmica, que pode ser determinística ou estocástica. Nesta última, é levada em consideração a natureza estocástica das variáveis, como por exemplo, afluições dos reservatórios.

Do latim *simulare*, simular é conotado como reproduzir ou imitar, da forma mais aproximada possível do real, certos aspectos de uma situação ou processo; elaborar, empregar ou explorar modelos computacionais para a reprodução, representação ou imitação de fenômeno, situação ou processo concretos. A simulação torna então possível realizar experiências com modelos matemáticos em computadores. Esta técnica é muito utilizada na prática e, apesar de não ser otimizante, proporciona meios para o tratamento detalhado do comportamento de sistemas. A vantagem dos modelos de simulação reside no fato de permitirem uma representação detalhada do protótipo e desta maneira avaliar com maior precisão o comportamento do sistema projetado, além de prever a resposta quando algumas variáveis são modificadas.

3.1. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

A técnica da otimização é muito difundida na literatura para modelar sistemas de reservatórios. HALL et al. (1968) foram os pioneiros a usar programação dinâmica para um

único reservatório destinado à geração de energia elétrica. O problema, cujo estágio era o tempo (janeiro de 1928 a dezembro de 1934), estava sujeito a restrições de quantidade de água turbinada e armazenada, sendo capaz de dar informações sobre o volume de água que deveria ser liberado para outros fins, total de energia gerado, retorno financeiro e situação final do reservatório.

A programação linear foi inicialmente aplicada no problema de planejamento de uma bacia hidrográfica em 1962 e, recentemente, YEN & CHEN (2001) testaram diferentes estratégias de alocação de água para prever oferta e demanda deste recurso em Taiwan no ano de 2011. O propósito foi maximizar os benefícios dos usos da água e minimizar o custo a eles relativos, tendo como restrições equações de continuidade, vazão máxima e sanitária, capacidade dos reservatórios. Dois cenários foram simulados, um com e outro sem bombeamento de água subterrânea. Uma estratégia de alocação testada foi a lei de conservação local que prioriza os usos na seguinte ordem: doméstico, agricultura, produção de energia, industrial. Dotando de dados hidrológicos de 1974 a 1993, os resultados indicaram que em 2011 haverá períodos de seca, devendo ser melhorado a infraestrutura dos reservatórios e represas e também transferir água utilizada na irrigação para os setores industriais de forma a improvisar benefícios quando houver escassez.

Mais de um método de otimização foi usado no tradicional modelo de BECKER & YEH (1974), o qual compõe-se de programação linear e programação dinâmica para determinar a política ótima de demanda de água para os diversos fins em períodos específicos, garantindo que no final a capacidade de armazenamento seja adequada para operações futuras. A programação linear é utilizada para obter o valor da liberação ótima de água de cada reservatório no intervalo de tempo de interesse, tendo como função objetivo a minimização da perda de energia, uma vez que os reservatórios possuirão maior quantidade de água, satisfazendo os outros usos. As restrições são: equações de continuidade, limites de fluxo, capacidade mínima e máxima de armazenamento, produção máxima de energia do sistema. A programação dinâmica foi usada para selecionar as melhores alternativas para produzir mais energia nos horários de pico. Estas formulações foram aplicadas na Califórnia e bons resultados foram obtidos a partir de séries de vazões e quantificação da demanda.

Devido à não-linearidade dos sistemas hidrelétricos e também porque a operação de reservatórios é naturalmente seqüencial, BRAGA et al. (1991) apoiaram-se na programação dinâmica estocástica para maximizar a produção de energia em um sistema de reservatórios da Bacia do Baixo Tietê, Estado de São Paulo. Este mesmo tipo de programação foi utilizado por ALAYA et al. (2003) para identificar a regra operacional ótima de um reservatório destinado à irrigação, baseada na satisfação da demanda de água para este uso em conflito com o

armazenamento mínimo desejado no reservatório. Outra aplicação da programação dinâmica estocástica foi feita por PEREIRA & PINTO (1985).

SYLLA (1995) apresentou um modelo formulado através da programação não-linear determinística para planejamento de operações de reservatórios destinados aos usos múltiplos da água. A solução proposta foi penalizar as restrições, não lineares, para que estas fossem incorporadas na função objetivo.

Devido à dificuldade apresentada pela programação dinâmica estocástica, utilizada para modelar sistemas de reservatórios, JAIRAJ & VEDULA (2000) propuseram a utilização da otimização baseada na lógica fuzzy. Muitas vezes é indispensável a consideração da aleatoriedade das variáveis envolvidas em um problema de otimização em recursos hídricos. Caso o problema possa ser resolvido através da programação dinâmica, então a introdução das variáveis aleatórias leva à programação dinâmica estocástica. Esta programação considera que as probabilidades de ocorrência das vazões futuras, por exemplo, dependem exclusivamente do valor atual da vazão, muitas vezes não conhecido. Já a lógica fuzzy utiliza-se da programação linear considerando as variáveis do problema incertas. Os autores, então, aplicaram este modelo em um sistema de três reservatórios, no rio Upper Cauvery, sul da Índia, com o objetivo de minimizar a retirada de água para irrigação a partir da meta de demanda em bases mensais. O modelo foi satisfatório e, comparado com a programação dinâmica estocástica, sua facilidade de aplicação é vantajosa, uma vez que se trata de um problema de grande dimensionalidade e requer espaço na memória do computador.

Problemas de definição de regras operacionais de reservatórios foram estudados por BRAGA & BARBOSA (2001) através da otimização em rede de fluxo formulada na análise multiobjetivo. O modelo desenvolvido pelos pesquisadores foi aplicado na bacia do rio Paranapanema, Estado de São Paulo. Outra aplicação de otimização em rede de fluxo foi feita por HSU & CHENG (2002) para analisar oferta e demanda de água em uma bacia do Taiwan. A rede de fluxo era formada por uma rede de arcos e nós. As variáveis de decisão foram o armazenamento do reservatório e a oferta de água para abastecimento doméstico e irrigação, de forma a encontrar o mínimo da soma das variáveis de decisão multiplicadas pelos seus respectivos coeficientes de custo. O problema estava sujeito às seguintes restrições: equações de continuidade, regras operacionais do reservatório, redução na oferta de água devido à escassez, perdas por evaporação.

Além destes métodos de otimização, encontram-se métodos não tradicionais, como as redes neurais artificiais, programação baseada na lógica fuzzy, algoritmos genéticos (REIS & AKUTSU, 2002; TUNG et al., 2003) e técnicas como “simulated annealing” (SA) e “ant colony algorithms” (ACAs).

3.2. MODELOS DE SIMULAÇÃO

O mais antigo modelo de simulação, segundo YEH (1985), associado aos recursos hídricos, é o estudo feito pelos Engenheiros das Forças Armadas Americanas em 1953 que consistia em estudar a operação de seis reservatórios no Rio Missouri.

BRASS ("Basin Runoff and Streamflow Simulation"), criado na década de 80, foi originalmente desenvolvido para auxiliar as operações de controle de cheia (COLON & MCMAHON, 1987). É um modelo iterativo que inclui o coeficiente de escoamento superficial, armazenamento de reservatórios e capacidade de sequência de vazões dinâmicas.

MODSIM é um modelo de simulação e otimização em rede de fluxo, desenvolvido na "Colorado State University" por LABADIE et al. (1984). Uma rede de fluxo é formada por arcos e nós; os nós representam reservatórios, demandas, reversões, confluências e outros pontos importantes de um sistema e os arcos são os elos de ligação entre os nós e representam trechos de rios, adutoras, canais e outras estruturas.

MODSIM é capaz de gerar planos operacionais a fim de satisfazer metas, prioridades e limitações específicas. Pode também ser usado para avaliar compromissos entre usos conflitantes da água durante períodos de pouca disponibilidade. Este modelo foi utilizado por AZEVEDO et al. (1998) na Bacia do Rio Piracicaba. De acordo com os autores, a capacidade de combinar simulação e otimização é um dos pontos fortes do MODSIM em relação aos outros modelos, nos quais as soluções ótimas devem ser determinadas por tentativas e erros.

O MODSIM inclui a capacidade de otimizar a operação de sistemas mediante a utilização de um algoritmo de rede de fluxo chamado "out of kilter". Trata-se essencialmente de um algoritmo de programação linear desenvolvido para a solução de problemas de otimização de redes de fluxo, com a finalidade de assegurar que a água seja simultaneamente distribuída de acordo com aspectos físicos, hidrológicos e institucionais. Os modelos com versões anteriores ao MODSIM baseados em redes de fluxo que utilizaram este algoritmo comprovaram sua eficácia quando aplicados com sucesso em sistemas complexos de bacias hidrográficas, como a Bacia do Rio Grande (GRAHAM et al., 1986); a Bacia de Poudre no Colorado, EUA (LABADIE et al., 1986); a Bacia Upper Colorado (LAW & BROWN, 1989); e a Bacia de Upper Snake (FREVERT et al., 1994). Em todos estes casos, prioridades na distribuição de água foram utilizadas no gerenciamento do sistema.

MODSimp32 é uma versão atualizada do modelo MODSIM, com uma interface amigável desenvolvida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, onde foi testado, documentado e é de domínio público. Este modelo foi utilizado por AZAMBUJA (2000) em um estudo para determinar a disponibilidade hídrica da bacia rio Piracicaba, relacionando as

demandas de água atuais e futuras. O estudo mostrou que nesta bacia, em períodos secos, não é possível atender a todas as demandas de água e manter a vazão ecológica do rio.

LEVY & BAECHER (1999) desenvolveram o NileSim, simulador da bacia do rio Nilo. Tendo como benefício rapidez, interface gráfica e facilidade no uso, este software pode ser operado por pessoas não técnicas que participam do planejamento de uma bacia hidrográfica. O usuário pode obter gráficos de demanda por tempo, alocação de água dos maiores canais, descarga anual e volume dos reservatórios no ano em estudo.

No sudeste dos Estados Unidos, RITSCHARD et al. (1999) propuseram o modelo de simulação HADCM2 ("Hadley Centre Global Climate Model") para analisar o impacto das precipitações futuras e a crescente demanda de água para agricultura. O aumento da produção de milho, soja e trigo nesta região acarretou a crescente demanda de água para irrigação na estiagem. O estudo mostrou que nos próximos 20 a 40 anos a disponibilidade de água declinará 10%. Além do aumento da área irrigada, a contribuição para a escassez de água se deve também ao crescimento populacional, causando competição dos usos doméstico, industrial e recreação, acelerando a deterioração da qualidade da água.

MAUAD (2000) realizou um estudo em Alqueva, Portugal, utilizando o simulador "Interactive River Aquifer Simulation" (IRAS), apresentando resultados da simulação computacional do aproveitamento de fins múltiplos, incluindo os rios Guadiana e Ardila, a barragem de Alqueva e o açude de Pedrogão. O modelo forneceu como resultados resiliência, confiabilidade e vulnerabilidade do sistema para os diversos usos da água. BRANDÃO & RODRIGUES (2000) utilizaram o mesmo simulador para caracterizar usos futuros da água à jusante do rio Guadiana que atenda às condições hidrológicas e os períodos de seca, de forma que sejam compatíveis com a sustentabilidade ecológica do rio. Através da simulação, os pesquisadores obtiveram uma ajuda para prever a vazão sanitária do rio e eventualmente poderá ocorrer, em 2012, que alguns reservatórios não atinjam 1/3 da capacidade de armazenamento. PEIXOTO (2002) aplicou o modelo IRAS na bacia do rio Sapucaí-Mirim no Estado de São Paulo.

O software Hydro foi usado no Paquistão por TATE & FARQUARSON (2000), de forma a atender oferta e demanda de água nos próximos 60 anos no que cabe à geração de energia e irrigação. Este modelo foi aplicado em um único reservatório e, através de 30 anos de série histórica de vazões e curvas de regras operacionais, foi capaz de estimar o retorno econômico e vida útil do reservatório de Tarbela, no rio Indus, que está sujeito a perda de volume devido ao acúmulo de sedimentos. Diferentes cenários foram simulados, considerando a construção de uma nova represa.

A partir de uma versão modificada do modelo hidrológico MIKE SHE e de dados meteorológicos, topográficos, tipos de solo e de vegetação, ANDERSEN et al. (2001) aplicaram o simulador, num espaço de tempo de 4 anos, para uma área de 16 km² que após rigorosos testes de calibração e validação foram conduzidos para os 375000 km² da bacia do rio Senegal.

O modelo MIKE BASIN, desenvolvido pela “Danish Hydraulic Institute” (DHI) da Dinamarca, é uma nova e versátil ferramenta de suporte a decisões no planejamento de recursos hídricos, cujas potencialidades tornam-no executável para análises hidrológicas extensas desde sistemas independentes de abastecimento de água para consumo urbano, irrigação, produção de energia até sistemas de usos múltiplos. Este modelo associa técnicas de simulação numérica e otimização através de uma rede de fluxo, além de permitir a integração com um sistema de informações geográficas através da interface do software ArcView GIS.

MIKE BASIN é uma representação matemática de uma bacia hidrográfica que permite analisar diversos cenários conflitantes, indicando a melhor decisão a ser tomada obtendo, assim, melhores benefícios técnico-econômicos, sociais e ambientais. Uma das vantagens do modelo é seu rápido tempo de processamento de dados. MIKE BASIN utiliza informações de séries de vazões, precipitação, séries meteorológicas, informações sobre as demandas, irrigação, dentre outras.

MACDONALD (1998) utilizou três modelos matemáticos para estudar o gerenciamento ambiental em uma bacia hidrográfica da Tailândia. Foram analisados os atuais e futuros usos da água e a poluição dos rios para vários cenários. Um dos modelos foi o NAM (“Nedbor-Afstromnings Model”) que é um modelo para a transformação chuva-vazão, outro foi o MIKE BASIN para analisar os diversos usos da água e, por último, o modelo de qualidade LOAD que permite a análise não pontual e difusa da poluição usando uma distribuição espacial no ambiente do ArcView.

STORM (1999) aplicou o modelo MIKE BASIN na bacia do rio Cape Fear na Carolina do Norte, Estados Unidos da América. O autor motivou-se em fazer o gerenciamento dos recursos hídricos desta bacia devido, entre outros fatores, à explosão do crescimento populacional e conseqüente aumento no consumo de água. O modelo permitiu a visualização geográfica da rede de fluxo e componentes como retiradas, descargas e reservatórios. A capacidade de integração do MIKE BASIN com o ArcView fornece uma interface geográfica conveniente, que faz o modelo ser acessível para vários usuários. O modelo mostrou ser uma ferramenta eficaz na avaliação de usos futuros da água superficial do rio Cape Fear.

Na Polônia, DYRBAK (2000) realizou um estudo, através do MIKE BASIN, para determinar a melhor política operacional de reservatórios. O objetivo foi prevenir a ocorrência de cheias, enquanto maximizava a oferta de água para abastecimento urbano e irrigação. Dentre

os resultados obtidos, o modelo foi eficiente para otimizar a regra de operação de reservatórios. Comparado às regras operacionais originais, os valores da função objetivo foram reduzidos em até 72%. As soluções ótimas para a regra de operação têm níveis de controle de inundação diferentes para cada mês, não sendo constante durante o ano todo (como era originalmente o caso).

KJELDSEN & ROSBJERG (2001) fizeram um estudo de caso na bacia do rio Mgeni, África, com o modelo MIKE BASIN. Foram considerados dois cenários alternativos para resolver o problema de não atendimento de futuras demandas de água, considerando os usos para abastecimento urbano e industrial, irrigação e manutenção das vazões ecológicas dos rios. Para avaliar os cenários, os pesquisadores utilizaram um novo critério de sustentabilidade, baseado nos índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade.

LIMA (2002) utilizou o MIKE BASIN para analisar os conflitos atuais e futuros decorrentes dos usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia no Estado de São Paulo. Os usos estudados foram abastecimento urbano e industrial, irrigação e geração de energia elétrica, levando-se em consideração a transferência de água para a região metropolitana de São Paulo através do Sistema Cantareira e as previsões de aumento das demandas de água da bacia hidrográfica. Os resultados das simulações mostraram que para atender as crescentes demandas e ao mesmo tempo minimizar os conflitos entre os usos múltiplos da água, é necessário aumentar as vazões mínimas liberadas pelos reservatórios do Sistema Cantareira e reduzir as vazões transferidas para a região metropolitana de São Paulo. De acordo com o autor, o MIKE BASIN mostrou-se extremamente versátil, de fácil operação, permitindo uma boa representação do sistema em estudo.

Outras aplicações do modelo são descritas por AMMENTORP (1999), LARSEN et al. (2000) e JENSEN et al. (2000).

3.3. MODELOS DE SIMULAÇÃO COMBINADOS COM OTIMIZAÇÃO

A flexibilidade da simulação e o poder exploratório da otimização podem ser adquiridos combinando as duas ferramentas. Deste modo, SINHA et al. (1999) calcularam o armazenamento ótimo de um reservatório utilizado para irrigação e geração de energia hidrelétrica na Índia, de forma que o custo total de construção, operação e manutenção fosse mínimo. Através da otimização foram conhecidos os valores das variáveis de decisão (consumo e carência de água na irrigação) e, computados os valores das demandas mensais, a capacidade do reservatório e potência do gerador foram avaliadas através da simulação utilizando vazões medidas ao longo de 34 anos.

O rendimento de um sistema de múltiplos reservatórios é definido como sendo a quantidade de água que pode ser fornecida em cada espaço de tempo numa confiabilidade especificada. Entende-se por confiabilidade a probabilidade de não ocorrer uma falha no sistema durante um período de tempo particular. DANDY et al. (1997) testaram simulação e otimização para calcular o rendimento e, segundo eles, a simulação é mais iterativa e é necessário conhecer as regras de operação do reservatório.

NISHIKAWA (1998) aplicou um modelo de simulação-otimização para gerenciar os recursos hídricos da cidade de Santa Bárbara, Califórnia, sob severas condições de seca. O objetivo do modelo foi minimizar o custo da oferta de água num horizonte de planejamento de 5 anos, sujeito às restrições de capacidade de armazenamento, carga hidráulica, controle de uso da água subterrânea e quantidade demandada. O problema foi formulado através da programação linear e foi usado o modelo de simulação de água subterrânea MODFLOW. As variáveis de decisão foram as demandas mensais das águas superficiais e subterrâneas.

Segundo NEELAKANTAN & PUNDARIKANTHAN (1999), as regras operacionais de reservatórios usuais não são eficazes quando se depara com o problema de escassez de água encontrado nos países da Ásia. Neste contexto, regras de proteção se tornam vantajosas, quando se quer racionar a oferta de água de forma que o sistema fique sustentável. Fizeram, portanto, um trabalho para garantir o abastecimento de água urbano em um sistema de reservatórios. A partir da programação não linear irrestrita, os pesquisadores obtiveram as variáveis de decisão, e pela simulação validaram a função objetivo. O modelo de simulação baseou-se em redes neurais artificiais que garantiu sua rapidez, porém não gerou informações que pudessem ser obtidas através da simulação convencional.

ALI & SHUI (2001) partiram de equações de balanço de massa e dez anos de dados observados para desenvolver um simulador de reservatórios e, pela otimização, maximizar demanda para irrigação e capacidade de armazenamento dos reservatórios em períodos de seca ou não.

RAO et al. (2001) empregaram simulações mensais e otimização fundada em programação dinâmica determinística para definir regras de operação do reservatório de Kirazdere, na Turquia, de forma que seja plausível a liberação de água para abastecimento urbano e controle de cheias. A partir de dados característicos do reservatório e séries temporais de evaporação, vazão e demanda, soluções foram obtidas através dos gráficos gerados pelo programa.

A política ótima de operação de dois reservatórios do Nepal foi determinada por KUMAR & GUPTA (2001) através da programação dinâmica estocástica. A função objetivo foi maximizar a potência gerada pelas usinas hidrelétricas e estava sujeita às equações de

continuidade, vazão turbinada, capacidade de armazenamento dos reservatórios. Um modelo de simulação utilizou a resposta da otimização e séries sintéticas de vazões para descrever as modificações ocorridas no fluxo do rio à jusante dos reservatórios, onde há um grande projeto de irrigação. O estudo mostrou, através de índices de confiabilidade, que nas estações secas haverá um acréscimo de até 20% na oferta de água para as culturas irrigadas.

Trabalho similar de definição de regras operacionais de reservatórios e simulação do fluxo do rio foi feito por BELAINEH et al. (1999).

3.4. SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO (SSD)

A definição clássica apresentada por SPRAGUE & CARLSON (1982) é que um SSD é um sistema computacional interativo que ajuda os tomadores de decisão a utilizar informações e modelos para resolver problemas complexos ainda não estruturados. Um SSD integra os seguintes sub-sistemas: (1) base de modelos, (2) banco de dados e (3) módulo de diálogo para a comunicação entre usuário e sistema.

Segundo LABADIE et al. (1989), sistemas de suporte à decisão constituem metodologia apropriada para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

AQUATOOL (ANDREU et al., 1996) é um SSD muito usado na Espanha. Inclui simulação, otimização, modelo para água subterrânea e avaliação de riscos.

RiverWare (ESCHENBACH et al., 2001) é um SSD que permite ao usuário, através de otimização, simulação e interface gráfica amigável, definir as melhores políticas operacionais de um sistema de recursos hídricos. Os dados de entrada necessários são as características físicas e econômicas do sistema, objetivos prioritários e parâmetros referentes aos reservatórios.

De acordo com FROUKH (2001) a demanda de água para uso urbano depende de diferentes variáveis demográficas, sócio-econômicas, climáticas, etc. Com a finalidade de prever as necessidades futuras, ele se apoiou em um sistema de suporte à decisão que engloba os seguintes componentes: sistema de informação geográfica (SIG), sistema de gerenciamento de banco de dados, modelos matemáticos, dentre outros. Desta forma, analisou detalhadamente a quantidade de água que será consumida e medidas de conservação.

O controle operacional de reservatórios requer decisões oportunas, principalmente quando ocorre o problema de inundação que necessita de soluções emergenciais. Tendo como base severos eventos de cheia ocorridos em 1995 na Coreia, SHIM et al. (2002) aproveitaram dos artifícios da programação dinâmica e do Sistema de Informações Geográficas (SIG) para construir um sistema de suporte à decisão que pode ser utilizado de imediato para controle de

cheia de reservatórios destinados aos usos múltiplos da água. SIG é uma ferramenta computacional que eficientemente gera, armazena, analisa, manipula informações espaciais e produz gráficos e mapas. A função objetivo do modelo foi minimizar fluxos excedentes em pontos controlados da bacia, manter o nível de armazenamento ideal, minimizar rápidas variações da descarga do reservatório, minimizar as perdas por extravasamento.

O SSD desenvolvido e aplicado no Japão por MERABTENE et al. (2002) avalia a suscetibilidade do sistema hídrico à seca e ajuda a determinar estratégias ótimas de oferta de água. Integram neste SSD três modelos fundamentais: (1) modelo chuva-vazão; (2) modelo de previsão de demanda de água; (3) modelo de operação de reservatórios. Este último é baseado em técnicas de simulação e otimização para avaliar o desempenho do sistema hídrico e designar estratégia de operação apropriada. A otimização é feita através dos Algoritmos Genéticos e introduz índices de confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência.

O SSD proposto por KOUTSOYIANNIS et al. (2002), aplicado na Grécia, é baseado em um esquema de parametrização-simulação-otimização, aproximação de pequena dimensão, que reduz o grau de liberdade. Os parâmetros das regras de operação dos reservatórios destinados aos múltiplos usos são trabalhados para serem variáveis de controle, de forma que não dependam das afluências, mas das propriedades estatísticas. O modelo fornece como resposta a melhor política operacional do sistema hídrico, garantindo os objetivos e as restrições para uma dada confiabilidade e um dado regime hidrológico.

CAI et al. (2003) descreveram o desenvolvimento e aplicação de um SSD que integra, em um único modelo, componentes hidrológicos, econômicos e agrônômicos. Deste modo, o usuário terá habilidade de refletir sobre estes três componentes, suas inter-relações e conseqüências quando uma política de planejamento for escolhida. O modelo foi feito para ser aplicado em regiões áridas, onde a irrigação domina os principais usos da água.

3.5. MODELOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

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 na água. Estimulados pela necessidade de controle da poluição que ameaçava a saúde da população norte-americana, foram iniciados estudos em 1920 no rio Ohio 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 o motivo de preocupação de muitos pesquisadores que queriam cada vez mais aprender a partir dos dados de campo e laboratoriais. Porém, ela não conseguia descrever muitos dos 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 dos aspectos qualitativos da água. A pressão pública se manifestou na imposição de controles e financiamento de projetos para prevenção e remediação 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 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. Foi uma revolução.

A partir de 1970, o simples modelo 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 quinze variáveis de qualidade, dentre elas: oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, temperatura, algas e clorofila-a, 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.

No campo da otimização, o primeiro trabalho foi o proposto em 1965 por DEININGER apud SOMLYÓDY (1997)¹, que utilizou a programação linear estruturada através

¹ DEININGER, R. A. (1965). Water Quality Management: the Planning of Economically Optimal Pollution Control Systems. PhD thesis, Northwestern University apud SOMLYÓDY, L. (1997). Use of Optimization Models in River Basin Water Quality Planning. *Water Science and Technology*, v. 36, n.5, p. 209-218.

de várias aproximações de equações diferenciais no perfil do oxigênio dissolvido dos rios. DYSART apud SOMLYÓDY (1997)², em 1969, utilizou a programação dinâmica para problemas também com OD. A programação não linear foi utilizada por HWANG (1973) para incorporar as variações sazonais encontradas no leito do rio, quando o parâmetro analisado era ainda OD.

As agências governamentais, preocupadas com a poluição e disponibilidade de água nos rios, têm iniciado programas de prevenção da poluição. Para avaliar a viabilidade de uma iniciativa do governo de Taiwan, NING et al. (2001) apoiaram-se no simulador QUAL 2E, inter-relacionando a qualidade e quantidade de água no rio Kao-Ping, presente em uma área sujeita ao desenvolvimento industrial e cuja população necessita de uma água que esteja mais adequada para os diversos usos. O sistema analisado considerou a demanda para abastecimento urbano, industrial, irrigação e transferência de água para outra região, além da poluição pontual causada pelo despejo industrial, esgoto doméstico e rejeitos das fazendas de criação de animais. O modelo foi calibrado com dados de DBO, OD, nitrogênio amoniacal e fósforo total coletados em um período sem chuva e validado com dados do período chuvoso. Os resultados foram apresentados através de um perfil de todos os rios da bacia divididos em classes especiais que a simulação gerou, mostrando o padrão da qualidade da água e a consonância desta com os usos múltiplos.

Geralmente, quando se quer remediar 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 atraente o gerenciamento da qualidade da água dos rios de uma bacia hidrográfica. Um dos planos que são muito discutidos na literatura é encontrar soluções para a emissão de efluentes.

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 balancear a conveniência e economia.

² DYSART, B. C. (1969). The Use of Dynamic Programming in Regional Water Quality Planning. Proceedings of the 4th Annual AAPSE Workshop, 10-1 to 10-23 apud SOMLYÓDY, L. (1997). Use of Optimization Models in River Basin Water Quality Planning. *Water Science and Technology*, v. 36, n.5, p. 209-218.

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 constituintes de uma dada quantidade de águas residuárias e a localização do despejo 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), 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 única maneira de incluir a otimização nos processos de planejamento é dispor de algumas formas de programação matemática.

No campo de planejamento de emissão das águas residuárias domésticas e industriais, encontra-se o trabalho de DROLIC & KONCAN (1999) que utilizaram o QUAL 2E para avaliar o impacto causado pelo despejo de águas residuárias na bacia do rio Sava, Eslovênia. Os autores apresentaram os procedimentos para determinação dos dados inseridos no modelo, como constantes de velocidades do oxigênio sedimentado, da degradação, reacração e características hidrológicas do rio. Calibrado a partir de medidas de campo e laboratoriais e após análise sensível, o modelo foi validado de forma que simulasse a máxima concentração de DBO das águas despejadas para não violar a concentração de OD permitida no rio durante o verão.

Nesta mesma linha, WANG & JAMIESON (2002) apresentaram uma estratégia baseada na combinação de Algoritmos Genéticos e Redes Neurais Artificiais, com o objetivo de minimizar o custo total (investimento e operação) das estações de tratamento sujeitos aos padrões de emissão e satisfação dos requerimentos de qualidade do curso d'água. Quando um padrão de emissão fixo é assumido, o problema se restringe em selecionar a melhor forma de tratamento, enquanto que avaliar um local com melhores condições para receber a descarga, o problema envolve estratégias de alocação de despejo dos efluentes.

A combinação da alta carga poluente, baixa descarga e alto tempo de residência resultam na degradação biológica do rio, principalmente à sua jusante. DEMUYNCK et al. (1997) analisaram as variáveis OD e amônia através de dois simuladores, ambos modelos numéricos dinâmicos: Salmon-Q, modelo hidrodinâmico e de qualidade de água; e DESIM, modelo hidrológico e de transporte de poluentes, que avaliou o impacto causado pela descarga dos principais rios tributários. A calibração e validação dos modelos foram feitas a partir de dados de séries históricas de vazão e medidas de concentração de OD e amônia em três pontos distintos ao longo do rio e num período de quatro anos (1990 a 1994).

Quando é tratado o problema da qualidade da água em sistemas de rios de uma bacia hidrográfica, depara-se com o conflito de quem é responsável por manter a qualidade da água deste sistema (agências controladoras de poluição, por exemplo) e de quem polui o corpo da água (indústrias, por exemplo). Para solucionar este problema, SASIKUMAR & MUJUMDAR (1998) propuseram um modelo de otimização denominado “Fuzzy waste-load allocation model” (FWLAM) que, através de suas formulações, maximiza o nível mínimo de satisfação da qualidade do sistema tanto das agências controladoras quanto dos poluidores, propondo um padrão de qualidade para as águas despejadas nos rios. Através de um sistema de rios hipotético, foram inseridos na lógica fuzzy (variáveis incertas) os padrões de qualidade de água exigidos pelas agências controladoras em conflito com os poluidores. Com um modelo matemático qualitativo, que leva em sua formulação distribuição espacial e temporal de poluentes, medidos através de concentrações de OD, foi previsto qual deveria ser a concentração máxima de DBO que as indústrias poderiam despejar e o custo total mínimo para elas efetuarem o tratamento caso esta concentração não fosse atingida.

Alguns modelos que avaliam os conflitos dos usos múltiplos dos recursos hídricos no aspecto quantitativo possuem extensões capazes de analisar o perfil qualitativo do corpo d’água. DAÍ e LABADIE (2001) utilizaram uma extensão do modelo MODSIM que analisa aspectos qualitativos, o MODSIMQ, trabalhando iterativamente com o QUAL 2E. Através de um algoritmo de programação não-linear e levando em consideração mecanismos de transporte unidirecionais como advecção e dispersão, o modelo mostrou-se eficiente como um apoio à decisão para soluções de problemas prioritários, como demanda de água para irrigação, sem afetar aspectos políticos, quantitativos e qualitativos da água da bacia. Outro exemplo é o MIKE BASIN que, com o seu auxílio, 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.

O modelo MIKE BASIN também foi utilizado por JENSEN et al. (2000) para dar suporte ao desenvolvimento e avaliação de políticas locais e estratégias de menor custo que estivessem de acordo com os requerimentos legais. Dentre os principais objetivos, o modelo foi aplicado para: mostrar as principais fontes de poluição, condições da qualidade da água dos rios, estações de abastecimento de água e tratamento de esgoto existentes, opções técnicas existentes para melhorar o tratamento das águas residuárias e os custos a elas associados, avaliação da qualidade da água após simular diversos cenários, identificar alternativas de menor custo do tratamento dos efluentes domésticos e industriais, de forma que estes fossem tratados até o grau de concentração admissível dos seus constituintes.

O aumento do consumo de água para geração de energia e irrigação e a deterioração qualitativa da água acarretaram na diminuição da população de uma determinada espécie de

peixe na bacia do rio Klamath, Califórnia. Utilizando modelos de simulação, um quantitativo (MODSIM), modelo de rede de fluxo, e outro qualitativo (HEQ-5Q), CAMPBELL et al. (2001) avaliaram algumas estratégias operacionais para reduzir este problema, através de mudanças na alocação da água, de forma que a temperatura e o OD estivessem numa faixa razoável para que não houvesse mortalidade dos peixes. HEQ-5Q tem a capacidade de fornecer, através da simulação, dados diários da qualidade da água com variações espaciais e temporais, requerendo para isto apenas dados de descargas médias diárias de poluentes, vazões e meteorológicos.

Através da programação linear, CAMPBELL et al. (2002) gerenciaram a qualidade da água destinada ao abastecimento urbano através dos parâmetros de salinidade, cloreto e resíduo total.

O crescimento excessivo do fitoplâncton não é restrito apenas à localização, mas a uma combinação de fatores ambientais (temperatura, profundidade, luz e nutrientes). Para evitar esta proliferação, alterações devem ser feitas no corpo da água; um exemplo comum é adicionar sulfato de cobre. LEWIS et al. (2002) validou o simulador “Phytoplankton Responses to Environmental Change” (PROTECH), a partir de um ano de dados meteorológicos em um reservatório australiano destinado a abastecimento urbano, para diagnosticar a resposta do crescimento de comunidades fitoplanctônicas a partir de mudanças feitas na água (adição de sulfato de cobre e agitação).

Os Sistemas de Suporte à Decisão também são utilizados nos problemas de qualidade da água. Os austríacos JOLMA et al. (1997) fizeram um SSD chamado StreamPlan (“Spreadsheet Tool for River Environmental Assessment Management and Planning”) capaz de analisar políticas alternativas de gerenciamento da qualidade da água, o qual é organizado por quatro modelos básicos: (1) modelo de simulação do fluxo do rio e qualidade de sua água, que nada mais é do que um modelo hidrológico e de balanço de massa. O modelo qualitativo é uma extensão da equação de Streeter-Phelps e considera concentrações de OD, DBO, nitrogênio amoniacal, nitrato e fósforo total; (2) modelo econômico usado para identificar custo de investimento, operação e manutenção; (3) modelo de sistemas de tratamento de águas residuárias; (4) modelo de otimização que, pela programação linear, minimiza os custos sujeitos às seguintes restrições: nível mínimo de tratamento das águas residuárias, concentrações permitidas dos parâmetros qualitativos e quantidade permitida de emissão de poluentes.

AZEVEDO et. al. (2000) apresentaram um SSD que leva em consideração os aspectos qualitativos e quantitativos das águas superficiais. Para a simulação das alternativas de planejamento foram usados em conjunto os modelos matemáticos MODSIM e QUAL2E-UNCAS. A utilização do SSD em um estudo de caso na bacia do rio Piracicaba mostrou que é necessário aumentar os níveis de tratamento de águas residuais e aumentar as vazões para

atender as crescentes demandas da bacia, além de manter a derivação de água para a cidade de São Paulo. Foram propostas medidas como programas de conservação, reúso da água e construção de novos reservatórios.

SPANOU & CHEN (2000) desenvolveram um SSD baseado no método de objeto orientado para ajudar no controle das fontes pontuais de poluição em sistemas de rios. O modelo é capaz de representar a bacia hidrográfica através de uma rede de arcos e nós; quantificar a poluição do rio (em termos de OD, DBO, nitrogênio total e amoniacal) e seu fluxo; avaliar políticas de controle da poluição. A simulação da qualidade da água inicia no primeiro nó e procede com o balanço de massa rio abaixo, até que seja encontrado um local que recebe descarga de efluentes violando o padrão admissível da qualidade da água.

Pelo dizer de EISELE et al. (2001), o SSD “Non Point Source Model” (NPSM) que utiliza uma combinação da linguagem Fortran com a interface gráfica do Sistema de Informação Geográfica (SIG), foi capaz de simular o transporte de nitrogênio em uma bacia hidrográfica da Alemanha, mostrando que a concentração de nitrato no leito do rio é controlada pela entrada de nitrogênio no volume de controle, dinâmica da água e reações ocorridas no meio.

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS MODELOS

No contexto apresentado, as técnicas de simulação e otimização são muito utilizadas para analisar aspectos quantitativos e qualitativos dos processos de sistemas de rios, fluxos, vazões, operações de reservatórios, uso e proteção dos aquíferos, sistemas de distribuição de água, usos da água e vários outros processos hidrológicos e atividades de gerenciamento. A análise de sistemas é promissora quando a escassez dos recursos hídricos está preocupando a população dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, 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 freqüentemente há um grande número de soluções viáveis para ser investigadas e, portanto, a solução ótima não é obtida. Os modelos de simulação podem ser facilmente desenvolvidos com os softwares disponíveis no momento e muitas vezes são fáceis de aprender a usar e entender os resultados. Eles também admitem problemas com relações não lineares.

As técnicas de otimização também são muito utilizadas nesta área. 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 (para abastecimento, geração de energia, irrigação, etc) dentro de um dado espaço de tempo e num sistema complexo. 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 onde 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. 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 freqüentemente usada nos problemas de gerenciamento dos recursos 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.

Por causa das limitações impostas por cada técnica e pelo desenvolvimento dos computadores e softwares, pesquisadores têm adotado novas tecnologias, como a lógica fuzzy, redes neurais artificiais e algoritmos genéticos, para encontrar o ótimo global em problemas lineares ou não.

A tomada de decisões em relação aos sistemas hídricos envolve diversos fatores e atualmente deve ser realizada com a participação de vários setores da sociedade tornando-se uma tarefa cada vez mais complexa. Para auxiliar no processo decisório são necessários planejamentos estratégicos que possam identificar as melhores alternativas de desenvolvimento dos recursos hídricos, considerando a distribuição equitativa, o uso racional, a maximização do desenvolvimento econômico e social, a minimização dos impactos ambientais, entre outros. Devido a aspectos como complexidade dos sistemas hídricos, incertezas futuras, existência de conflitos, necessidade de investimentos de grande porte, as decisões devem ser estudadas e suas consequências, simuladas, fazendo com que o melhor plano de ação seja escolhido. Com esse propósito surgiram os Sistemas de Suporte à Decisão, que são ferramentas capazes de considerar os diferentes aspectos de uma bacia hidrográfica armazenando todas as informações e dados existentes. Tais sistemas visam auxiliar na análise, operação e planejamento de sistemas hídricos fornecendo resultados que podem ser analisados e entendidos por usuários não especializados, permitindo que todos os envolvidos participem do processo decisório.

A crescente complexidade de problemas que enfrentam a gestão dos recursos hídricos faz com que se torne necessário a adoção de novas tecnologias, de forma que a maioria dos aspectos de uma bacia hidrográfica seja considerada e representada com o mínimo de simplificações. As ferramentas computacionais são de extrema importância para o setor hídrico.

4. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ-MIRIM/GRANDE

Todos os dados foram extraídos do Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000) e do Relatório Final do Projeto Básico (2001).

4.1. LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GERAIS

Definida como Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) pela Lei nº 9034/94, de 27 de dezembro de 1994, a Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande configura uma área de 9166,86 km², dos quais fazem parte vinte e dois municípios com sede nesta Bacia e dois com suas respectivas sedes na UGRHI 04 – Bacia do Pardo/Grande. Localiza-se no extremo norte do Estado de São Paulo (Figura 4.1) e é considerada interestadual, pois se limita ao norte com o Estado de Minas Gerais pelo rio Grande, o qual recebe contribuições de alguns afluentes, e a cabeceira do rio Sapucaí-Mirim, principal rio constituinte desta Bacia, está no Estado mineiro.

Figura 4.1: Localização da UGRHI no Estado de São Paulo

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

Considerando os principais afluentes da UGRHI 08, foram delimitadas sete sub-bacias que podem ser vistas na Figura 4.2.

Figura 4.2: Principais sub-bacias que compõem a UGRHI Sapucaí-Mirim/Grande

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

Uma breve caracterização das sete sub-bacias é:

- 1- Alto Sapucaí: tem uma área no Estado de São Paulo de 2151,44 km². Os afluentes principais que formam os rios Sapucaí-Mirim, do Esmeril e Santa Bárbara nascem em território mineiro. Esta sub-bacia abrange inteiramente os municípios de Itirapuã, Patrocínio Paulista e Santo Antônio da Alegria e parcialmente os municípios de Batatais e Altinópolis, cuja sede está na UGRHI Pardo/Grande.
- 2- Médio Sapucaí: com uma área de 1059,82 km², abrange os municípios de Restinga, São José da Bela Vista e uma parte de Franca e Nuporanga. Os principais afluentes que drenam para esta sub-bacia são: ribeirões dos Bagres, Santo Antônio, do Salgado (margem direita) e da Pimenta; e córregos das Corredeiras, da Barrinha e das Palmeiras (margem esquerda).
- 3- Baixo Sapucaí: abrangendo 1834,55 km², fazem parte desta sub-bacia os municípios de Guará, Ipuã, São Joaquim da Barra e parcialmente Nuporanga, Ituverava, Miguelópolis, Guaira, além de uma pequena área do município de Orlândia que tem sede fora da Bacia.
- 4- Ribeirão do Jardim/Córrego do Lageado: com 945,68 km², é composta pelo afluente do ribeirão do Jardim, que tem sua foz na entrada do reservatório de Volta Grande e corresponde à área do município de Guaira e dos córregos do Lageado e da Penitência que drenam direto para o reservatório de Volta Grande na área do município de Miguelópolis.
- 5- Rio do Carmo: com 1303,36 km², esta sub-bacia tem como afluentes os ribeirões do Japão, Água Limpa, Ponte Nova e da Bandeira. Apenas o município de Jeriquara está totalmente inserido na sub-bacia, enquanto os municípios de Ribeirão Corrente, Cristais Paulista, Pedregulho, Ituverava, Buritizal, Aramina e Miguelópolis estão parcialmente em sua área.
- 6- Afluentes do Rio Grande: corresponde ao conjunto dos cursos d'água que drenam diretamente para o reservatório do rio Grande e formam uma área de 1425,80 km², destacando-se como principais afluentes os ribeirões Bom Jesus, São Pedro, do Pari e do Tamanduá. Esta sub-bacia abrange a área total dos municípios de Rifaina e Igarapava e uma parte de Pedregulho, Buritizal e Aramina.
- 7- Rio Canoas: com apenas 446,21 km², fazem parte desta sub-bacia os municípios de Franca e Cristais Paulista.

Para melhor visualização, os vinte e dois municípios que fazem parte desta Bacia são mostrados na Figura 4.3.

Figura 4.3: Municípios paulistas com área na UGRHI

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

4.2. GEOLOGIA

A bacia hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim situa-se geologicamente na borda nordeste da Bacia Intracratônica do Paraná, predominando rochas do Grupo São Bento representadas pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral.

Seguem-se, em termos de área de distribuição, os sedimentos correlacionados à Formação Itaqueri. Duas reduzidas ocorrências de arenitos da Formação Aquidauana (Grupo Tubarão da Bacia do Paraná) são encontradas nos extremos nordeste e sudeste da área da UGRHI. As rochas quartzíticas do Canastra, únicas representantes do embasamento cristalino nesta área, têm ocorrência de pequena expressão na porção nordeste, sua extensão é de aproximadamente 40 km na direção noroeste-sudeste.

A Formação Aquidauana do Grupo Tubarão aparece em apenas duas pequenas exposições na área da UGRHI, ambas junto ao limite com o Estado de Minas Gerais. A maior delas na sua porção nordeste e também a nordeste de Cristais Paulista, enquanto que a outra no extremo sudeste, próximo a Santo Antônio da Alegria.

A Formação Pirambóia do Grupo São Bento é uma das unidades sedimentares de maior ocorrência no alto curso do rio Sapucaí-Mirim. Ocorrem em praticamente toda a porção leste e sudeste da UGRHI, desde a região a leste de Pedregulho para sul, até o extremo sudeste da bacia. É composta por uma sucessão de camadas arenosas de coloração avermelhada e esbranquiçada que atingem 270 m de espessura em superfície, podendo apresentar espessuras da ordem de 350 m em subsuperfície, a oeste da Bacia do Sapucaí-Mirim/Grande. As características litológicas e sedimentares desta unidade indicam origem continental fluvial com depósitos de rios meandantes e pequenas lagoas associadas, em condições climáticas oxidantes.

Com uma distribuição bem menos generalizada, a Formação Botucatu ocorre no vale do rio Sapucaí-Mirim, a nordeste do município de Batatais e na porção norte da bacia, na região compreendida aproximadamente pelos municípios de Ituverava, Igarapava e Rifaina.

A unidade correspondente à Formação Serra Geral compreende a sequência de derrames de lavas basálticas com intercalações de arenitos com as mesmas características dos pertencentes à Formação Botucatu. Esta unidade apresenta a maior distribuição em área na UGRHI, cujos derrames dominam quase completamente a metade oeste e a porção central (de norte ao sul), além de recobrir em grande parte os arenitos das formações Pirambóia e Botucatu na faixa leste. A espessura máxima medida da formação indica 1700 m de derrames.

A Tabela 4.1 relata as principais características dos tipos de rochas da Bacia do Paraná presentes na UGRHI em questão.

Tabela 4.1: Características dos tipos de rochas da Bacia do Paraná presentes no nordeste do Estado de São Paulo

<i>Grupo</i>	<i>Formação</i>	<i>Tipos de rochas</i>
<i>São Bento</i>	<i>Serra Geral</i>	Rochas vulcânicas toleíticas dispostas em derrames basálticos, com coloração cinza a negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos, finos a médios, apresentando estratificação cruzada tangencial.
	<i>Botucatu</i>	Arenitos cólicos avermelhados de granulação fina a média, com estratificações cruzadas de médio a grande porte. Ocorrem restritamente depósitos fluviais de natureza areno-conglomerática e camadas localizadas de siltitos e argilitos lacustres.
	<i>Pirambóia</i>	Depósitos de arenitos finos a médios, avermelhados, siltico-argilosos, com estratificação cruzada ou plano-paralela, com níveis de folhelhos e arenitos argilosos e raras intercalações de natureza areno-argilosa.
<i>Tubarão</i>	<i>Aquidauana</i>	Depósitos continentais, predominando arenitos vermelho arroxeados, médios a grossos, feldspáticos e, subordinadamente, arenitos finos, conglomerados, siltitos, folhelhos rítmicos e diamictitos.

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

As coberturas sedimentares pós-basálticas correlacionadas à Formação Itaqueri ocupam grande parte da área da Bacia do Sapucaí-Mirim/Grande, geralmente nos divisores d'água. Aparece numa faixa alongada de sudeste para nordeste no limite desta UGRHI com as UGRHIs 4 (Pardo) e 12 (Baixo Pardo/Grande), na região de Batatais e Nuporanga; em toda a porção central da bacia, de Franca a Buritizal; e na região a nordeste de Buritizal e São José da Bela Vista. São arenitos conglomeráticos siltitos e conglomerados oligomíticos com estruturas hidrodinâmicas. As características dos sedimentos e das estruturas apontam ambiente fluvial muito energético, sujeito a bruscas mudanças de velocidade de transporte.

4.3. GEOMORFOLOGIA

As unidades de relevo do Estado de São Paulo que compõem a paisagem da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande, podem ser divididas, segundo os aspectos de relevo,

altitude, orientação das formas topográficas e processos de sedimentação e erosão, em duas grandes províncias: Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental Paulista. A primeira, com cerca de 500 a 1190 metros de altitude, ocupa em torno de 70% da área e abrange tanto a média como a alta porção da bacia. A segunda província, mais rebaixada (500 a 600 metros de altitude), ocupa a área restante, abrangendo especialmente a porção média inferior da bacia do Sapucaí-Mirim.

O Planalto Ocidental caracteriza-se por apresentar formas de relevo denudacionais, ou seja, um relevo monótono, levemente ondulado, de colinas amplas e baixas com topos convexos e aplanados.

As duas grandes províncias refletem uma grande variedade de sistemas ou formas de relevo.

O sistema de relevo predominante na UGRHI corresponde às Colinas Amplas, que são observadas na sub-bacia do Baixo Sapucaí. Neste setor predominam interflúvios com área superior a 4 km², topos extensos e aplainados, e vertentes com perfis retilíneos e convexos. Geralmente, a drenagem é de baixa densidade e apresenta padrão subdendrítico. Os vales são abertos com presença de planícies aluviais interiores restritas, podendo ocorrer, eventualmente, lagoas perenes ou intermitentes.

Também estão presentes as planícies fluviais, que são terrenos planos geradas por processos de deposição de sedimentos, que correspondem às áreas sujeitas a inundações periódicas. Apresentam declividades inferiores a 2%, são formadas por sedimentos fluviais arenosos e argilosos e o lençol freático é pouco profundo.

Outras formas de relevo encontradas são os Morrotes Alongados e Espigões, Morros Arredondados, Morros Amplos, Vertentes não Escarpadas, Escarpas Festonadas, Colinas Médias e Mesas Basálticas.

4.4. PEDOLOGIA

Do ponto de vista pedológico, a área da bacia engloba basicamente cinco unidades de solos: Litossolo Roxo, Latossolo Vermelho-Amarelo – Fase Arenosa, Litológico – Fase Substrato Basáltico, Regossolo e Hidromórficos.

A unidade Litossolo Roxo engloba solos muito profundos, argilosos, bem drenados e de coloração arroxeada. A pequena variação das características morfológicas faz com que os vários horizontes se apresentem pouco individualizados, com transições variando de graduais a difusas. Os solos desta unidade representam cerca de 76% da superfície da bacia. Possuem, em

geral, topografia que vai de suavemente ondulada a ondulada, com declives longos. Em certos pontos da bacia são encontrados em relevos mais acidentados.

A unidade Latossolo Vermelho Amarelo – Fase Arenosa é formada por solos profundos, de textura leve, bem drenados e de coloração vermelho amarelo. São solos ácidos de baixa fertilidade. Representam cerca de 15% da superfície da bacia do rio Sapucaí-Mirim.

A unidade correspondente ao solo Litológico – Fase Substrato Basáltica é caracterizada por apresentar solos pouco desenvolvidos, com espessura em torno de 35 cm. São solos com saturação de bases alta. Ocupam 3% da superfície da bacia, distribuídos em pequenas manchas espessas no extremo leste, divisa com o Estado de Minas Gerais.

A unidade Regossolo é enquadrada nos solos profundos, de textura muito leve, acentuadamente drenado, originados de arenitos, normalmente ácidos e com fertilidade muito baixa. Os solos desta unidade representam cerca de 5% da superfície da bacia do rio Sapucaí-Mirim, tendo como localização também o extremo leste.

A unidade representada pelo solo tipo Hidromórfico é constituída por solos de várzea, normalmente com relevo plano, pouco profundo, com características associadas com encharcamento redundando em acumulação de matéria orgânica na primeira camada ou fenômeno de redução nas camadas subjacentes. Os solos desta unidade representam cerca de 1% da superfície da bacia.

4.5. HIDROMETEOROLOGIA

Quando é abordado o gerenciamento dos recursos hídricos em uma determinada bacia hidrográfica, são necessários dados hidrológicos e, conseqüentemente, torna-se interessante conhecer o clima da região, uma vez que a disponibilidade de água está relacionada com o ciclo hidrológico.

Encontramos ao longo do ano diferentes características climáticas, decorrentes dos avanços e recuos das massas de ar. Anos de pluviosidade elevada ocorrem quando as massas polares estão em ação. O oposto está relacionado com a atuação das massas intertropicais. Já os anos com pluviosidade média correspondem ao equilíbrio entre os dois sistemas.

Tendo como base a classificação climática proposta por Köppen, existem na bacia em estudo três tipos climáticos, a saber:

- Tropical úmido com estiagem no inverno.
- Quente úmido com inverno seco.

- Temperado úmido com estação seca.

A temperatura média anual é da ordem de 18 °C, sendo o trimestre mais frio maio-junho-julho. Esta temperatura pôde ser estimada através das temperaturas médias mensais mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Temperaturas médias mensais

<i>Meses</i>	<i>Temperatura média mensal (°C)</i>
Janeiro	19,0
Fevereiro	18,3
Março	18,5
Abril	17,5
Maio	16,6
Junho	15,4
Julho	15,3
Agosto	17,8
Setembro	18,9
Outubro	19,7
Novembro	18,8
Dezembro	18,7
<i>Anual (°C)</i>	17,9

Fonte: Relatório Final do Projeto Básico (2001)

A pluviosidade média anual nesta bacia atinge 1500 a 2000 mm. Como na maior parte do Estado, o período chuvoso ocorre de outubro a março, recebendo cerca de 80% das chuvas anuais, com o trimestre mais chuvoso de dezembro a fevereiro. O período mais seco vai de abril a setembro, apresentando precipitação média total de 210 mm. Este período recebe menos de 15% das chuvas anuais e no trimestre mais seco, entre junho e agosto, ocorre apenas 5% das chuvas.

A distribuição anual da precipitação média na Bacia do rio Sapucaí-Mirim pode ser caracterizada de acordo com os valores apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Precipitação média mensal

<i>Meses</i>	<i>Precipitação média mensal (mm)</i>
Janeiro	297
Fevereiro	228
Março	180
Abril	80
Maiο	57
Junho	27
Julho	22
Agosto	23
Setembro	72
Outubro	161
Novembro	201
Dezembro	276
<i>Anual (mm/ano)</i>	1623

Fonte: Relatório Final do Projeto Básico (2001)

4.6. SÓCIO-ECONOMIA

Crescimento populacional, industrialização, economia, uso e ocupação do solo, são temas que interferem no uso e na qualidade dos recursos hídricos.

O desenvolvimento da região em questão foi embasado nas atividades agropecuárias, criação de gado bovino e produção de açúcar, no século XVIII e, posteriormente com a cultura do café, no século XIX, cuja produção começa a se destacar a partir de 1886. Após a crise de 1929 não ocorreu abandono das terras, mas sim a substituição por novas culturas, como citricultura e algodão. A partir de 1950 a cultura canavieira foi a ignição do crescimento regional devido, principalmente, ao PROÁLCOOL e ao incentivo à exportação que também beneficiou a laranja, soja e a pecuária de corte e leite.

Os principais ramos industriais são: madeira, borracha, couro e peles, vestuário, calçado e artefatos, bebidas e alimentos. As cidades que mais se destacam são Franca que ocupa a 2ª posição no Estado de São Paulo na produção de couros, peles e calçados, e 7ª posição na produção de borracha; e São Joaquim da Barra que garante a 4ª posição na produção de bebidas.

Na produção agropecuária, nos anos de 1995/96, esta UGRHI alcançou um valor que correspondeu a uma participação de 6,61% do total do Estado. No que se refere à produção

animal, o município que mais contribuiu para o resultado foi Batatais, enquanto para o valor da produção vegetal o destaque foi o município de Guaíra.

Em termos da produção vegetal, o principal cultivo é o de soja, concentrado nos municípios de Guaíra, Miguelópolis, Ituverava e Ipuã. Em segundo lugar aparece a cana-de-açúcar, distribuída em todos os municípios da região, com destaque para Pedregulho, Franca e Cristais Paulista.

Com relação à exploração animal, o rebanho bovino é o mais representativo para a região, tanto a pecuária leiteira, para a qual destacam-se os municípios de Santo Antônio da Alegria, Batatais e São José da Bela Vista, como à destinada ao corte, nos municípios de Pedregulho e Franca. A suinocultura e a avicultura também constituem atividades econômicas importantes para a região.

Há na área total da bacia aproximadamente 620533 habitantes. Dentre eles, 82,13% do total é composto de população urbana. Em 1996, o conjunto de municípios da região com população inferior a 20000 habitantes detinha cerca de 22,02% da população total. Neste mesmo ano os municípios de Batatais, São Joaquim da Barra, Ituverava, Guaíra e Igarapava, com população entre 20000 e 50000 habitantes, abrigavam 31,51% da população. Franca era o único município com mais de 100000 habitantes e detinha 46,46% da população total.

Hoje em dia a proporção se mantém a mesma. Franca, a maior cidade da bacia, possui 295722 habitantes em média, sendo 50,07% da população total. A estimativa para a década que se segue indica acréscimo populacional da ordem de 21%. A população urbana poderá representar 95,64% do total no ano de 2010. Estes dados podem ser conferidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: População total da UGRHI Sapucaí-Mirim/Grande

Municípios	População					
	1970	1980	1991	1996	2000	2010
Aramina	5046	3437	4057	4220	4336	4620
Batatais	29262	37184	43952	47927	50222	55449
Buritizal	5571	3869	3800	3195	2964	2188
Cristais Paulista	4974	4904	5626	6297	6749	7904
Franca	93638	147962	231334	266617	295722	368338
Guairá	26883	25589	30887	33078	34855	38871
Guará	12765	13273	16320	18182	19741	23629
Igarapava	21202	20224	22211	25700	28505	36602
Ipuã	9977	9113	10327	10983	11446	12459
Itirapuã	4684	4923	5046	5371	5639	6277
Ituverava	27380	27414	32948	34097	34827	36300
Jeriquara	1709	2558	3238	3245	3240	3173
Miguelópolis	18396	13485	17352	18643	19487	21151
Nuporanga	5683	5047	5776	6113	6371	6997
Patrocínio Paulista	8635	9014	9702	10472	11054	12282
Pedregulho	14780	12899	13724	14775	15412	16768
Restinga	5693	3517	4391	4900	5224	6032
Ribeirão Corrente	2194	2730	3218	3517	3736	4256
Rifaina	6180	3347	2902	3244	3606	4702
Santo Antônio da Alegria	4462	5273	5069	5447	5718	6336
São Joaquim da Barra	24359	29201	35829	40016	43359	51630
São José da Bela Vista	6781	6634	7119	7752	8320	9672

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

4.7. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

A disponibilidade hídrica superficial pode ser verificada na Tabela 4.5. Segundo o Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000), estes dados deveriam ser mais realistas, havendo necessidade de estudos para oferecer dados mais consistentes aos usuários, planejadores, gestores ou técnicos em geral, auxiliando o planejamento da utilização dos recursos hídricos da bacia.

Tabela 4.5: Disponibilidade hídrica superficial mínima ($Q_{7,10}$) por sub-bacia

<i>Sub-bacia</i>	<i>Área de drenagem (km²)</i>	<i>Pluviosidade média histórica até 1997 (mm)</i>	<i>Vazão média (m³/s)</i>	<i>$Q_{7,10}$ (m³/s)</i>
Alto Sapucaí	2151,44	1570,73	36,46	7,05
Médio Sapucaí	1059,82	1590,10	17,87	3,46
Baixo Sapucaí	1834,55	1522,73	30,93	5,99
Rib. Jardim/Cor. Lageado	945,68	1465,210	12,00	2,32
Rio do Carmo	1303,36	1681,00	20,16	3,9
Afluentes do rio Grande	1425,80	1869,48	22,06	4,27
Rio Canoas	446,21	1601,57	7,52	1,46
Total	9166,86		138,80	28,45

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

4.8. USO DOS RECURSOS HÍDRICOS

4.8.1. Abastecimento Urbano e Industrial

A demanda mensal média para o abastecimento público nos 22 municípios com sede na UGRHI totaliza 2,077 m³/s. Destes, 1,498 m³/s são oriundos de captação superficial. A utilização de águas superficiais é realizada em 11 municípios, dos quais apenas Franca e Restinga possuem captação superficial exclusivamente (Tabela 4.6). As captações que atualmente estão em funcionamento podem ser vistas na Tabela 4.7.

Tabela 4.6: Porcentagem de captação de água para abastecimento urbano

<i>Município</i>	<i>Sub-bacia</i>	<i>Superficial</i> (%)	<i>Subterrânea</i> (%)
Aramina	Rio do Carmo/ Afluentes do Rio Grande	0	100
Batatais	Alto Sapucaí/ Médio Sapucaí	52	48
Buritizal	Rio do Carmo/ Afluentes do Rio Grande	0	100
Cristais Paulista	Rio do Carmo	80	20
Franca	Alto Sapucaí/ Médio Sapucaí	100	0
Guaira	Baixo Sapucaí/ Ribeirão do Jardim/ Córrego do Lageado	65	35
Guará	Médio Sapucaí/ Baixo Sapucaí	0	100
Igarapava	Afluentes do Rio Grande	5	95
Ipuã	Baixo Sapucaí	80	20
Itirapuã	Alto Sapucaí	0	100
Ituverava	Baixo Sapucaí/ Rio do Carmo	88	12
Jeriquara	Rio do Carmo	0	100
Miguelópolis	Baixo Sapucaí/ Ribeirão do Jardim/ Córrego do Lageado	0	100
Nuporanga	Médio Sapucaí/ Baixo Sapucaí	0	100
Patrocínio Paulista	Alto Sapucaí	30	70
Pedregulho	Rio do Carmo/ Afluentes do Rio Grande	93	7
Restinga	Alto Sapucaí/ Médio Sapucaí	100	0
Ribeirão Corrente	Médio Sapucaí/ Rio do Carmo	0	100
Rifaina	Afluentes do Rio Grande	0	100
Santo Antônio da Alegria	Alto Sapucaí	0	100
São Joaquim da Barra	Baixo Sapucaí	70	30
São José da Bela Vista	Médio Sapucaí/ Baixo Sapucaí	90	10

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

Tabela 4.7: Captações superficiais cadastradas para abastecimento urbano nos municípios

<i>Município</i>	<i>Rio ou Córrego</i>	<i>Demanda(m³/s)</i>
Batatais	Córrego da Cachoeira	0,0694
Batatais	Córrego do Peixe	0,0250
Cristais Paulista	Ribeirão dos Cristais	0,0167
Franca	Ribeirão do Macaco	0,0500
Franca	Ribeirão Pouso Alegre	0,2000
Franca	Rio Canoas	0,7000
Guaíra	Ribeirão do Jardim	0,0208
Igarapava	Córrego da Mata	0,0272
Igarapava	Dreno Limeira	0,0029
Ipuã	Córrego Sant'Ana	0,0417
Ituverava	Rio do Carmo	0,1500
Patrocínio Paulista	Córrego das Pedras	0,0052
Patrocínio Paulista	Córrego da Taquara	0,0042
Pedregulho	Córrego do Indaiá	0,0300
São Joaquim da Barra	Ribeirão São Joaquim	0,1273
São José da Bela Vista	Ribeirão do Buritis	0,0278
Total		1,4982

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

Para o uso industrial, foram identificadas 7 captações superficiais mostradas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Captações superficiais cadastradas para abastecimento industrial nos municípios

<i>Município</i>	<i>Proprietário</i>	<i>Rio ou Córrego</i>	<i>Demanda (m³/s)</i>
Batatais	Usina Batatais S. A. Açúcar e Alcool	Afluentes rio Sapucaí	0,0010
Batatais	Usina Batatais S. A. Açúcar e Alcool	Rio Sapucaí	0,0653
Buritizal	Irmãos Biagi S. A. Açúcar e Alcool	Ribeirão da Bandeira	0,0664
Guaira	Destilaria Mandu S.A.	Rio Pardo	0,0208
Guaira	Cia. Mogiana de Óleos Vegetais	Córrego do Mangue	0,0008
Patrocínio Paulista	Central Energética Vale do Sapucaí Ltda	Rio Sapucaí	0,0019
São Joaquim da Barra	Destilaria Alta Mogiana Ltda	Rio Sapucaí	0,0133
Total			0,1695

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

4.8.2. Irrigação

Em 1972, o Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE realizou o Diagnóstico do Plano Estadual de Irrigação, onde foram selecionadas diversas áreas do Estado como prioritárias para instalação de projetos de irrigação. A partir do final da década de 70 foram difundidos vários programas de fomento à agricultura irrigada, tanto pelo governo Estadual como Federal, para incentivar a prática da irrigação através da venda de equipamentos produzidos pela indústria nacional ao produtor rural, com juros subsidiados e dois anos de carência. A área da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande foi beneficiada e a partir de 1970 iniciou o processo de ser, hoje em dia, uma das maiores áreas agrícolas do Estado de São Paulo.

A carência de dados é um problema sério na região. De um total de 3822,09 km² de áreas agrícolas, 202,56 km² são irrigadas. De acordo com o Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000), apenas dados de outorga foram obtidos,

sendo de 14 usuários consumindo em média 0,026 m³/s. E, contradizendo, o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (2000-2003) registra um consumo de 9,86 m³/s.

4.8.3. Usinas Hidrelétricas

Nesta UGRHI estão instaladas 10 usinas geradoras de energia, das quais três são administradas pela Furnas Centrais Elétricas, três pela Central de Energia de Minas Gerais – CEMIG, quatro pela Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL (Tabela 4.9).

Tabela 4.9: Usinas hidrelétricas instaladas na Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande

<i>Nome</i>	<i>Entidade Operadora</i>	<i>Rio</i>	<i>Potência (MW)</i>
Porto Colômbia	FURNAS	Rio Grande	320
Estreito	FURNAS	Rio Grande	1050
Mascarenhas Moraes	FURNAS	Rio Grande	476
Volta Grande	CEMIG	Rio Grande	380
Igarapava	CEMIG	Rio Grande	210
Jaguará	CEMIG	Rio Grande	424
Buritis	CPFL	Ribeirão Bandeira	0,8
São Joaquim	CPFL	Rio Sapucaí-Mirim	8,0
Dourados	CPFL	Rio Sapucaí-Mirim	10,75
Esmeril	CPFL	Córrego do Esmeril	1,760

Fonte: Adaptado do Relatório Final do Projeto Básico (2001)

Segundo o Relatório Final do Projeto Básico (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 das duas usinas em operação, PCH Dourados e PCH São Joaquim, de propriedade da CPFL, ambas consideradas de fio d'água. Em 1998, foi outorgada à CPFL a autorização para continuação dos estudos dos aproveitamentos do referido rio. Após análises, a CPFL considerou viável a implantação de mais três usinas que estão em projeto básico: PCH Palmeiras, PCH Anhangüera, PCH Retiro.

Segundo o mesmo Relatório, o objetivo de conectar novas usinas ao sistema já existente é não só gerar melhorias nos níveis atuais de suprimento energético da região, como também aumentar a geração da própria CPFL. Além disso, os aproveitamentos Palmeiras,

Anhangüera e Retiro foram concebidos de forma a diversificar a utilização da água, estabelecendo outras finalidades além daquelas específicas para geração de energia. Dentre elas: criação de áreas de lazer, aumento da produtividade pesqueira, abastecimento público, irrigação de terras agrícolas. Essas pequenas centrais visam atender preferencialmente a demanda dos mercados locais de Guará, São Joaquim da Barra, Orlândia e Ituverava.

A Pequena Central Hidrelétrica de Dourados localiza-se entre os municípios de São José da Bela Vista e Nuporanga, sendo seguida da PCH de São Joaquim. Os aproveitamentos Palmeiras, Anhangüera e Retiro estão situados no curso do rio Sapucaí, no trecho entre os municípios de São Joaquim da Barra e Guará (Figura 4.4).

Figura 4.4: Localização dos aproveitamentos hidrelétricos

Fonte: Relatório Final do Projeto Básico (2001)

Os dados principais das 5 PCHs são mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Dados das PCHs instaladas e em fase de implantação no rio Sapucaí-Mirim

	<i>Dourados</i>	<i>São Joaquim</i>	<i>Palmeiras</i>	<i>Anhangüera</i>	<i>Retiro</i>
N. A. Montante (m)	587,34	582,65	556,00	540,50	523,00
N. A. Jusante (m)	557,26	554,80	542,73	523,10	509,82
Área do reservatório (km ²)	2,70	0,93	2,67	2,00	3,13
Potência instalada (MW)	10,75	8,00	13,60	18,50	14,40

Fonte: Relatório Final do Projeto Básico (2001)

4.8.4. Aqüicultura

A utilização de cursos d'água para atividades de aqüicultura constitui uso não consuntivo, porém pode alterar a qualidade da água captada, uma vez que são lançados complementos alimentares para as criações. Os municípios que apresentam maior número de propriedades com atividades de aqüicultura são Franca e Pedregulho. A Tabela 4.11 mostra as vazões superficiais captadas por município segundo o banco de dados do DAEE.

Tabela 4.11: Vazões superficiais captadas para aqüicultura

<i>Município</i>	<i>Vazões captadas (m³/s)</i>
Batatais	0,022
Franca	0,001
Guaíra	0,020
Nuporanga	0,014
Patrocínio Paulista	0,019
São Joaquim da Barra	0,003
Total	0,079

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

4.9. BALANÇO HÍDRICO

No balanço demanda e disponibilidade (Tabela 4.12) são apresentadas as análises comparativas entre os valores de disponibilidade hídrica superficial e demandas para as sete sub-bacias que compõem a UGRHI-08. A vazão para a área rural foi estimada em razão do tipo de cultura; Q_{URB} é a vazão para abastecimento público, recreação e uso industrial; Q_{RUR} é a vazão para irrigação e agropecuária; $Q_{TOTAL} = Q_{URB} + Q_{RUR}$.

Tabela 4.12: Disponibilidade e demandas estimadas para a UGRHI e sub-bacias

<i>Sub-bacia</i>	<i>Área de drenagem (km²)</i>	<i>Disponibilidade</i>	<i>Demandas (l/s)</i>			<i>Demandas</i>
		<i>Hídrica (l/s)</i>				<i>(l/s)</i>
		<i>Q_{7,10}</i>	<i>Q_{URB}</i>	<i>Q_{RUR}</i>	<i>Q_{TOT}</i>	
Alto Sapucaí	2151,44	7050	0	2540	2540	4510
Médio Sapucaí	1059,82	3460	30	490	520	2940
Baixo Sapucaí	1834,55	5990	182	1660	1842	4148
Rib. Do Jardim/Cor. Lajeado	945,68	2320	263	600	863	1457
Rio do Carmo	1303,36	3900	900	110	1010	2890
Afluentes do Rio Grande	1425,80	4270	565	490	1055	3215
Rio Canoas	446,21	1460	106	740	846	614
TOTAL	9166,86	28450	2046	6620	8676	19774

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

4.10. FONTES DE POLUIÇÃO

4.10.1. Fontes Pontuais

- Cargas poluidoras de origem doméstica:

As cargas poluidoras de origem doméstica referem-se aos pontos de lançamento de esgotos coletados em áreas urbanas. São considerados como fontes pontuais de poluição direta dos cursos d'água onde são lançados, podendo também afetar, de forma indireta, as águas subterrâneas e solos.

Foram identificados 57 pontos de lançamentos de efluentes domésticos de uso público, resultando em carga orgânica potencial total de 29715 kg DBO₅/dia (Tabela 4.13). As cargas orgânicas potenciais por municípios foram calculadas de acordo com a população atendida pela rede coletora, adotando-se uma média teórica de 54 g DBO₅/habitante/dia, valor utilizado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. Uma vez que não existem dados e análises sistemáticas das cargas remanescentes nos sistemas de tratamento, foram adotados valores teóricos de eficiência dos tipos de tratamento usados. Verifica-se que 31

pontos de lançamento possuem tratamento prévio, correspondendo a 54% do total. Somente o município de Franca gera 45,6% da carga orgânica potencial de toda a UGRHI.

Tabela 4.13: Lançamento de carga orgânica doméstica por município

<i>Município</i>	<i>Corpo receptor</i>	<i>Tratamento</i>	<i>Carga orgânica (kg DBO₅/dia)</i>	
			<i>Potencial</i>	<i>Remanescente</i>
Aramina	Córrego do Paraíso	Lodo de decantação	228	46
Batatais	Rio Sapucaí-Mirim	Nenhum	2486	2486
Buritizal	Córrego dos Buritis	Lagoa Facultativa	173	35
Cristais Paulista	Ribeirão da Mococa	Lagoa Anaeróbia e 2 facultativas	340	51
Franca	Rio Sapucaí-Mirim	Lagoa anaeróbia	786	118
	Rio Sapucaí-Mirim	Lodo ativado convencional	11731	2346
	Rio Sapucaí-Mirim	Fossa filtro	650	195
	Córrego Pouso Alto	Lagoa facultativa	47	9
	Ribeirão dos Macacos	Lodo ativado aeração prolongada	47	9
	Córrego Capão do Embira	Lagoa Facultativa	47	9
	Córrego Palestina	Lagoas anaeróbia, facultativa e maturação	47	7
	Córrego Capão do Embira	2 lagoas anaeróbias e 1 maturação	47	7

Tabela 4.13 (continuação): Lançamento de carga orgânica doméstica por município

<i>Município</i>	<i>Corpo receptor</i>	<i>Tratamento</i>	<i>Carga orgânica (kg DBO₅/dia)</i>	
			<i>Potencial</i>	<i>Remanescente</i>
Franca	Córrego Palestina	2 lagoas	47	7
		anaeróbias e 1 maturação		
	Córrego Espraiado	Fossa filtro	47	14
	Córrego Olhos D'água	Fossa filtro	47	14
Guaira	Córrego do Ambrósio	Lagoa de	7	1
		estabilização		
	Ribeirão do Jardim	Lagoa de	1361	272
		estabilização		
Guará	Córrego Santa Quitéria	Lagoa de	418	83
		estabilização		
	Rio Sapucaí- Mirim	Nenhum	755	755
Igarapava	Córrego Cortado	3 lagoas de decantação	189	38
	Córrego Santa Rita	Nenhum	760	760
	Córrego das Marocas	Nenhum	190	190
Ipuã	Córrego da Saudade	Nenhum	380	380
Ipuã	Córrego Sant'Ana	Lodo ativado e 2 lagoas facultativas	593	119
Itirapuã	Rio Sapucaí- Mirim	Lagoas anaeróbia, facultativa e de maturação	273	41
Ituverava	Rio do Carmo	Nenhum	1230	1230
	Ribeirão Capivari	Lagoa	205	41
	Ribeirão do Salto	Lagoa	205	41

Tabela 4.13 (continuação): Lançamento de carga orgânica doméstica por município

<i>Município</i>	<i>Corpo receptor</i>	<i>Tratamento</i>	<i>Carga orgânica (kg DBO₅/dia)</i>	
			<i>Potencial</i>	<i>Remanescente</i>
Ituverava	Córrego da Cachoeirinha	Lagoa de decantação	205	41
Jeriquara	Córrego Jeriquara	Lagoa facultativa	158	32
Miguelópolis	Córrego São Miguel	Nenhum	494	494
	Córrego São Miguel	Fossa Filtro	494	148
Nuporanga	Córrego Espírito Santo	Nenhum	165	165
	Córrego do Matadouro	Nenhum	165	165
Patrocínio Paulista	Rio Sapucaí-Mirim	Nenhum	283	283
	Rio Sapucaí-Mirim	Nenhum	283	283
Pedregulho	Córrego da Cascata	Lagoa anaeróbia e facultativa	552	110
	Ribeirão Bom Jesus	Lagoa Facultativa	138	28
Restinga	Córrego Santo Antônio	Lagoa anaeróbia, facultativa e de maturação	249	37
Ribeirão Corrente	Ribeirão Corrente/Ribeirão	Lagoa facultativa	175	35
	Córrego Sant'Ana			
Rifaina	Rio Grande	Nenhum	145	145
Santo Antônio da Alegria	Rio Sapucaí-Mirim	Nenhum	294	294
	Rio Sapucaí-Mirim	Nenhum	2161	2161
São Joaquim da Barra	Rio Sapucaí-Mirim	Nenhum	2161	2161
São José da Bela Vista	Ribeirão do Buritis	Nenhum	419	419

Tabela 4.13 (continuação): Lançamento de carga orgânica doméstica por município

<i>Município</i>	<i>Corpo receptor</i>	<i>Tratamento</i>	<i>Carga orgânica (kg DBO₅/dia)</i>	
			<i>Potencial</i>	<i>Remanescente</i>
<i>Total</i>			<i>29715</i>	<i>14144</i>

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

- *Cargas poluidoras de origem industrial:*

Assim como as cargas de origem doméstica, as cargas poluidoras de origem industrial correspondem aos lançamentos de efluentes líquidos diretamente nos rios e córregos, com ou sem tratamento prévio e constituem fontes indiretas de poluição dos solos e das águas subterrâneas. Entretanto, a grande diversidade de indústrias existentes no Estado de São Paulo faz com que haja uma variabilidade maior dos contaminantes lançados aos corpos d'água, incluindo-se metais pesados, compostos orgânicos tóxicos e muitos outros que dependem das matérias-primas e dos processos industriais utilizados.

De um total de 53 indústrias registradas, 44% tratam-se de curtumes. Essas indústrias produzem um total de 122379 t DBO₅/ano de carga orgânica potencial, sendo reduzida para 919 t DBO₅/ano de carga orgânica remanescente, com eficiência do tratamento de 99,2% (Tabela 4.14).

Verifica-se que a maioria da carga orgânica potencial é gerada pelas usinas de açúcar e álcool, correspondendo a 97% do total. Estas usinas usam seus efluentes líquidos industriais para irrigação da cultura canavieira e/ou recirculação em processos internos. Porém a eficiência dos sistemas de tratamento é bastante elevada, de forma que os maiores contribuintes para este tipo de poluição passam a ser os curtumes.

Tabela 4.14: Carga orgânica (potencial e remanescente) por ano de atividade

<i>Atividade</i>	<i>Carga orgânica (t DBO/ano)</i>		
	<i>Potencial</i>	<i>Remanescente</i>	<i>Eficiência</i>
Abatedouro	76	9	88,2
Beneficiamento de leite	376	55	85,4
Cooperativa agrícola	100	18	82,0
Curtume	2406	542	77,5
Fábrica de açúcar e álcool	119219	255	99,8
Fábrica de produtos químicos	98	23	77,0
Produtos alimentares/abatedouro e frigorífico	93	13	86,3
Saneamento	12	5	60,5
<i>Total</i>	<i>122379</i>	<i>919</i>	<i>99,2</i>

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

4.10.2. Fontes Difusas

As fontes difusas de poluição caracterizam-se por apresentar ampla área de contribuição, vindo de atividades que depositam poluentes de forma esparsa, podendo chegar aos corpos d'água apenas de forma intermitente, associada a períodos de chuvas.

Os núcleos urbanos sem atendimento por rede de esgoto podem constituir importante fonte de poluição difusa. O índice de não atendimento pela rede coletora de esgoto é de apenas 4% da população urbana de toda a UGRHI, correspondendo a um total aproximado de 22928 habitantes. Adotando-se a média de geração de carga orgânica potencial de 54 g DBO₅/habitante/dia, obtém-se um total de 1238 kg DBO₅/dia gerados nas áreas urbanas da UGRHI.

As áreas agrícolas podem ser consideradas fontes difusas de poluição. Os principais fatores que interferem na qualidade dos recursos hídricos estão relacionados à preparação do terreno, aplicação de fertilizantes, utilização de defensivos agrícolas e irrigação.

Na área em questão os principais contribuintes são os nitratos provenientes da aplicação de fertilizantes em culturas de cana-de-açúcar, citrus, além de pesticidas, herbicidas e fungicidas, associados a culturas de algodão, soja, feijão, hortaliças, citrus e cana-de-açúcar. Outra fonte importante de contaminação dos recursos hídricos, devido a práticas agrícolas, é a aplicação de vinhaça de cana-de-açúcar em áreas de sacrifício, estradas de terra ou para fertilização e irrigação das próprias culturas de cana.

5. METODOLOGIA

5.1. MODELO COMPUTACIONAL MIKE BASIN

MIKE BASIN, desenvolvido pela empresa DHI Water & Environment da Dinamarca, é uma representação de uma bacia hidrográfica e mostra a configuração dos rios principais e tributários, a hidrologia da bacia no espaço e no tempo e os vários esquemas de demanda de água.

O modelo é estruturado em uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente do ArcView do Sistema de Informações Geográficas. Todas as informações relativas à configuração da rede são editadas na tela do computador. MIKE BASIN explora a capacidade do ArcView e adiciona a dimensão de tempo nas informações espaciais.

Os nós representam, por exemplo, nascente e confluência de rios, postos fluviométricos, pontos de captação e de lançamento de águas residuárias, enquanto que os arcos representam rios, canais, linhas de adução, etc.

O esquema da Figura 5.1 mostra os principais dados de entrada e a resposta do modelo de simulação. O modelo aplica balanço de massa em toda a rede e encontra soluções no estado estacionário para cada intervalo de tempo, diário ou mensal, definido pelo usuário. Esta aproximação é adequada para sistemas que não variam bruscamente no tempo.

Figura 5.1: Conceito do modelo MIKE BASIN
Fonte: Adaptado do Guide to Getting Started Tutorial (2003)

As séries temporais são inseridas na forma de gráficos e tabelas no editor de séries históricas denominado TSEdit, cuja extensão é .dfs0. Os dados podem ser editados no Excel (Microsoft) e depois transferidos para o editor. A Figura 5.2 apresenta um exemplo de séries editadas no TSEdit.

Figura 5.2: Exemplo do editor de séries históricas TSEdit
Fonte: Guide to Getting Started Tutorial (2003)

Freqüentemente, vários usuários recebem água da mesma fonte. Em situações de escassez, o meio de distribuir a água disponível entre os usuários é solucionado pelo modelo por duas alternativas: “local priority rules” e “global priority rules”. O usuário define sua opção no início da simulação.

“Local priority rules” estabelece que quando mais de um usuário retira água do mesmo nó, deve-se estabelecer prioridades entre eles. O primeiro usuário da lista de prioridades irá receber, se possível, toda a sua demanda pela água, o segundo usuário irá receber o restante da água e assim por diante. Em outras palavras, a água não é repartida, e o último usuário da lista pode ficar sem água para seu consumo.

“Global priority rules” estabelece as prioridades do usuário. A água é distribuída de acordo com certas regras que podem afetar qualquer nó de todo o sistema. Por exemplo: pode-se definir uma regra que garanta a demanda de um usuário mais a jusante do rio; nenhum outro usuário irá receber água até que a demanda do primeiro esteja garantida. Várias regras podem ser definidas e cada uma pode ter a sua importância. Os tipos de regras mais usados são: garantir a demanda, como estipulada nas séries temporais, dos usuários da água; obrigar um fluxo mínimo em um determinado nó; armazenar água nos reservatórios em um nível especificado.

5.1.1. Rios

Os arcos representam as conexões entre os nós. Estas são desenhadas automaticamente entre os usuários da água (abastecimento urbano e industrial, irrigação, usinas hidrelétricas) e os nós de captação e retorno do fluxo, e possuem coloração preta ou verde que indicam primeira e segunda prioridade, respectivamente.

Os arcos de coloração roxa são os rios e o escoamento é modelado pelo MIKE BASIN pelo método de Muskingum.

O escoamento em rios se desenvolve numa seção mais estreita, com menor profundidade e maior velocidade que em reservatórios. Um dos métodos mais utilizados para a simulação do escoamento em rios é o método de Muskingum (TUCCI, 1998).

O método se baseia na equação da continuidade (eq. 1) e na equação do armazenamento, que pondera o efeito da vazão de entrada e saída do trecho.

$$\frac{dS}{dt} = I - Q_s + Q_L \quad (1)$$

I: Vazão de entrada

Q_s : Vazão de saída no trecho

Q_L : Contribuição lateral de todo o trecho

S : Armazenamento de água dentro do trecho ($S = Adx$)

O método de Muskingum sugere que a vazão e o armazenamento no trecho tem a seguinte relação com o nível da água:

$$\begin{aligned} O &= a \cdot h^n \\ S &= b \cdot h^m \end{aligned} \quad (2)$$

Onde O é a vazão; S é o armazenamento; h é a profundidade; a , b , m , n são parâmetros. A profundidade e a vazão são valores médios no trecho. Desprezando-se a variabilidade espacial destas funções e combinando as equações (2) resulta:

$$S = \frac{b}{a^{1/n}} [XI + (1 - X)Q]^{m/n} \quad (3)$$

Sendo que:

$$O = XI + (1 - X)Q$$

I : Vazão de entrada

Q : Vazão de saída no trecho

X : fator de ponderação das vazões

O modelo considera que $m/n = 1$ e $K = b/a^{1/n}$, resultando a seguinte expressão para o armazenamento:

$$S = K [XI + (1 - X)Q] \quad (4)$$

O parâmetro X representa o peso da integração da vazão no espaço e varia de 0 a 0,5. O parâmetro K tem unidade de tempo e representa o tempo médio de deslocamento da onda entre montante e jusante do trecho.

Os valores do armazenamento no tempo j e $j+1$ podem ser descritos da seguinte maneira:

$$S_j = K [XI_j + (1 - X)Q_j] \quad (5)$$

$$S_{j+1} = K [XI_{j+1} + (1 - X)Q_{j+1}] \quad (6)$$

A partir da eq. (5) e eq. (6), o armazenamento em um intervalo de tempo Δt é dado por:

$$S_{j+1} - S_j = K \{ [X I_{j+1} + (1-X) Q_{j+1}] - [X I_j + (1-X) Q_j] \} \quad (7)$$

5.1.2. Reservatórios

MIKE BASIN pode simular sistemas de reservatórios destinados aos usos múltiplos da água. O desempenho de políticas operacionais é simulado para reservatórios individuais através das curvas de regras operacionais. Curvas de regra operacional definem volume de armazenamento, nível da água e vazão como função do nível do reservatório e do tempo.

As Figuras 5.3 e 5.4 representam a tela do MIKE BASIN onde são inseridos os dados de entrada referentes aos reservatórios.

Figura 5.3: Dados gerais de entrada para os reservatórios

Figura 5.4: Entrada de séries temporais referentes aos reservatórios

Há dois tipos de reservatórios que podem ser modelados pelo MIKE BASIN: “Standard Reservoir” e “Allocation Pool Reservoir”. O primeiro considera o reservatório como um único armazenamento físico e todos os usuários captam água do mesmo volume disponível.

O “Allocation Pool Reservoir” tem um armazenamento físico, mas os usuários da água possuem, individualmente, certos volumes de armazenamento destinados a eles e outro volume que tem a finalidade de garantir uma liberação mínima que garanta a sustentabilidade do rio a jusante do reservatório.

A Figura 5.5 mostra o armazenamento principal dividido em quatro armazenamentos físicos.

Figura 5.5: Armazenamentos físicos da opção “Allocation Pool Reservoir”

O volume comum existe apenas se o nível de controle de inundação estiver acima da curva guia, permitindo assim o armazenamento de água entre os dois níveis. A curva guia corresponde à altura máxima do nível de conservação.

O volume de conservação é dividido num volume para qualidade da água (WQ) e um volume destinado a cada uso da água definido pelo usuário (W1, W2, ..., Wn).

Todos esses volumes são puramente conceituais e usados internamente no programa. Para cada intervalo de tempo da simulação, o reservatório é simulado na seguinte sequência:

- 1- A afluência do reservatório é adicionada ao armazenamento principal.
- 2- O nível do reservatório e sua área superficial são calculados baseados nas curvas cota-área-volume.
- 3- A precipitação é adicionada ao armazenamento principal (baseado na área superficial atual do reservatório).
- 4- Perdas por evaporação são extraídas do armazenamento principal (baseado na área superficial atual do reservatório).
- 5- Infiltração, baseado na área superficial atual do reservatório e na velocidade de infiltração, é retirada do armazenamento principal.

- 6- Os volumes individuais dos usuários e da qualidade são contabilizados por uma fração do armazenamento total do reservatório. Se a soma das perdas por evaporação e infiltração for maior que as afluições adicionadas com a precipitação, esses volumes de água irão diminuir. Qualquer contribuição de água maior que a capacidade individual destes volumes irá para o armazenamento comum.
- 7- Se houver água no volume comum, ela será distribuída entre os volumes de conservação. Se todos os volumes individuais forem preenchidos, o nível do reservatório estará na curva guia ou acima dela. Esta água estará disponível para o uso comum.
- 8- A liberação mínima requerida para manter a sustentabilidade ecológica a jusante do reservatório será subtraída, se possível, do armazenamento comum e, se necessário, no volume reservado para a qualidade da água. O mesmo é válido para atender as outras demandas.
- 9- Se, após liberar a vazão mínima requerida e atender às demandas, o nível do reservatório estiver acima do volume de controle de inundação, a água será vertida para o rio e a vazão máxima deverá ser especificada pelo usuário.

Definido o tipo de reservatório, deve-se fornecer o nível do reservatório, em metros, existente no início da simulação. Deve ser estabelecida a prioridade dos diversos usos que captam água do reservatório e é possível definir se há perdas no trajeto entre o reservatório e os usuários.

As regras de operação, que devem ser fornecidas, são definidas para várias zonas de armazenamento e podem variar com o tempo (Figura 5.6).

Figura 5.6: Zonas de armazenamento dos reservatórios
Fonte: Guide to Getting Started Tutorial (2003)

- 1- Zona de controle de inundação: serve 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 uma 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 uma certa fração definida para cada usuário. Se o reservatório estiver em um nível reduzido 1, a demanda para determinado usuário é reduzida por um fator de redução 1. Se o reservatório estiver em um 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 nesta zona.

A curva cota, área, volume deve ser fornecida e o modelo confere se ela obedece à seguinte relação:

$$V(h_{i+1}) \geq V(h_i) + A(h_i) \cdot (h_{i+1} - h_i) \quad (8)$$

Na eq. (8) h , A e V correspondem, respectivamente, à cota, área e volume. Em outras palavras, para cada cota subsequente, o acréscimo no volume deve pelo menos ser a área no estágio anterior multiplicada pela diferença de altura. Durante a simulação, MIKE BASIN faz interpolações nas curvas e, se houver qualquer resultado fora dela, aparece uma mensagem de erro na hora da simulação.

Dados de precipitação (mm/dia) e evapotranspiração potencial (mm/dia) também são necessários. A Figura 5.7 apresenta a entrada dos dados de precipitação no TSEdit.

Figura 5.7: Entrada dos dados de precipitação (mm/dia) no TSEdit

5.1.3. Irrigação

A demanda de água para irrigação pode ser dada de duas maneiras: diretamente através de uma série histórica ou indiretamente, através de dados gerais da agricultura (Figura 5.8) a partir dos quais o MIKE BASIN calcula a necessidade de água.

Figura 5.8: Entrada de dados de consumo de água na irrigação

Os dados indiretos dizem respeito aos dados de precipitação; culturas plantadas e suas demandas pela água durante o ano; área irrigada; coeficiente de ajuste que diz respeito às culturas que são irrigadas por equipamentos de irrigação e pela chuva. Pode-se optar pelos coeficientes 1 e 0. O primeiro indica que a demanda pela água dos equipamentos de irrigação leva em conta também a chuva. O ajuste é feito, para cada intervalo de tempo, comparando-se a necessidade de água de uma cultura (C) e a quantidade de chuva que caiu em um determinado período (R) e, dessa forma, a quantidade de água necessária para irrigação (I) pode ser computada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \text{Se } C > R &\Rightarrow I = C - R \\ \text{Se } C < R &\Rightarrow I = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

O coeficiente 0 indica que não se deve levar em consideração a precipitação, a cultura é irrigada regularmente por equipamentos.

Dados adicionais que podem ser fornecidos são: consumo de água para dessedentação de animais e número de cabeças.

5.1.4. Abastecimento urbano e industrial

Há três tipos de esquemas para abastecimento urbano e industrial: captação, lançamento e a combinação dos dois. Os dados necessários são as séries de demanda, em m^3/s , a fração de água captada nos aquíferos (quando se trabalha com água subterrânea) e a fração de água que retorna aos rios.

5.1.5. Usinas hidrelétricas

O modelo pode calcular 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. A potência gerada é calculada pela seguinte fórmula:

$$P = \Delta h \cdot Q \cdot \eta \cdot g \cdot \rho \quad (10)$$

Em que:

P: potência gerada

Δh : carga hidráulica (N.A. montante – N.A. jusante)

Q: vazão que passa através das turbinas

η : eficiência das turbinas

g: constante de aceleração da gravidade

ρ : densidade da água

A demanda de água para geração de energia é calculada através da resolução iterativa da eq. (10) para Q. Quando a diferença de altura é pequena, as turbinas são desligadas, primeiro porque a operação se torna ineficiente e segundo porque um grande volume de água seria requerido. Deste modo, pode ser fixado um Δh mínimo para operação das turbinas e se, Δh for menor que $\Delta h_{\text{mínimo}}$, nenhuma água passará pelas turbinas.

MIKE BASIN tem uma opção para produzir mais energia que a demanda, dependendo da capacidade instalada, no momento em que tiver um excedente de água no reservatório. Quando o reservatório estiver acima do nível de controle de inundação, a água que seria vertida passa pelas turbinas. O que não passar devido à capacidade delas é então vertido.

5.1.6. Água subterrânea

Para simular os processos que envolvem água subterrânea, deve ser escolhida esta opção no início da simulação. Os aquíferos interagem com os recursos hídricos superficiais através de: (1) infiltração do rio para o aquífero; (2) recarga subterrânea da bacia para o aquífero; (3) descarga do aquífero para o rio; (4) bombeamento de água para os usuários. Os dois primeiros devem ser fornecidos pelo usuário, enquanto que a descarga do aquífero para o rio é computada pelo MIKE BASIN através de um modelo hidráulico conceitual de reservatório linear, onde a vazão de saída é proporcional ao armazenamento.

5.1.7. Qualidade da água

MIKE BASIN simula o transporte no estado estacionário das seguintes substâncias que afetam a qualidade da água de rios e reservatórios: OD, DBO, DQO, amônia (NH_3), nitrato (NO_3), fósforo total, *Escherichia coli* e qualquer outra substância de interesse do usuário, desde que sua cinética seja de primeira ordem. A seguir são mostradas as equações usadas no modelo.

- *Consumo de oxigênio para degradação da matéria orgânica:*

A medida da concentração da DBO é descrita por uma equação de primeira ordem.

$$\frac{d\text{DBO}}{dt} = -k_{d3} \cdot \text{DBO} \quad (11)$$

DBO: concentração de DBO ($\text{mg O}_2/\text{l}$)

K_{d3} : coeficiente de desoxigenação a 20 °C(dia^{-1})

- *Nitrogênio:*

A velocidade da reação varia ao longo do rio devido aos processos de oxidação das várias formas químicas que apresenta o nitrogênio (Figura 5.9).

Figura 5.9: Componentes do ciclo aeróbio do nitrogênio

Os principais componentes do ciclo aeróbio do nitrogênio são mostrados na Figura 5.9, enquanto que a Figura 5.10 apresenta a sequência de reações de nitrificação com o aumento da distância de lançamento de fontes de amônia.

Figura 5.10: Reações sequenciais de nitrificação com o aumento da distância do ponto de lançamento de amônia.

MIKE BASIN considera dois componentes de nitrogênio, a saber: nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) e nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$).

O consumo de nitrogênio amoniacal é dado pela eq. (12).

$$\frac{d\text{NH}_3}{dt} = Y_d \cdot k_{d3} \cdot \text{DBO} - k_4 \cdot \text{NH}_3 \quad (12)$$

O primeiro termo do lado direito da equação corresponde ao nitrogênio vindo da decomposição da DBO amoniacal. Y_d é, portanto, a massa de nitrogênio contido por unidade de massa de DBO ($\text{mg NH}_3\text{-N/mg DBO}$) e k_{d3} foi definido anteriormente. O segundo termo do lado direito corresponde à oxidação da amônia e formação do nitrato e k_4 é o coeficiente de nitrificação a 20°C (dia^{-1}). O modelo não considera a formação intermediária do nitrito como está na Figura 5.9 e a variação no tempo da concentração do nitrato é dada por:

$$\frac{d\text{NO}_3}{dt} = k_4 \cdot \text{NH}_3 - k_6 \cdot \text{NO}_3 \quad (13)$$

O termo $k_4 \cdot \text{NH}_3$ corresponde à decomposição da amônia pelas bactérias na presença de oxigênio e k_6 é o coeficiente de desnitrificação a 20°C na unidade de dia^{-1} .

- Balanço de oxigênio:

O balanço de oxigênio é mostrado na eq. (14).

$$\frac{dOD}{dt} = k_2 \cdot (C_s - OD) - k_{d3} \cdot DBO - y_1 \cdot k_4 \cdot NH_3 - \frac{(R - P + B)}{d} \quad (14)$$

Sendo k_2 o coeficiente de reaeração, $k_2 \cdot (C_s - OD)$ é a taxa de oxigênio incorporado ao corpo d'água via reaeração na interface ar-água através da turbulência. $k_{d3} \cdot DBO$ representa o consumo de oxigênio para degradação da matéria orgânica. A constante y_1 é a soma de todo oxigênio consumido durante a nitrificação ($g\ O_2 / g\ NH_3-N$). R, P e B representam, respectivamente, em $g\ O_2/m^2/dia$, o oxigênio consumido na respiração, oxigênio produzido na fotossíntese e demanda de oxigênio nos sedimentos. Já d é, em metros, a profundidade da água.

- "Wild-card":

Fósforo total, DQO, *Escherichia coli* e qualquer outra substância de interesse do usuário podem ser modeladas, desde que sua reação seja de primeira ordem:

$$\frac{dX}{dt} = -k_x \cdot X \quad (15)$$

Onde:

X: concentração de qualquer substância de interesse

k_x : coeficiente cinético da reação de primeira ordem

- Ajuste das variáveis:

Todas as variáveis das equações descritas devem ser dadas no início da simulação ou pode-se usar os valores padrões (Figura 5.11). Nota-se que todos os coeficientes de velocidade são referentes à temperatura de 20 °C. A correção da temperatura é feita da seguinte maneira:

$$R_T = R_{20} \cdot C^{(T-20)} \quad (16)$$

Na eq. (16), R_T é o coeficiente cinético na temperatura desejada (T), R_{20} é o coeficiente cinético a 20 °C e C é um fator cujo valor padrão é 1,07.

Figura 5.11: Declaração dos parâmetros de qualidade da água

- Fontes de poluição:

As fontes pontuais de poluição estão relacionadas com os sistemas de abastecimento doméstico e industrial. O modelo adota que o fluxo de massa total do efluente é proporcional ao fluxo de retorno dos sistemas de abastecimento de água. MIKE BASIN oferece um conveniente método que descreve a concentração dos efluentes como função do tipo de tratamento de esgoto (Figura 5.12). Vários sistemas de tratamento usuais dos Estados Unidos e suas respectivas concentrações de efluentes estão pré-definidos no modelo, mas o usuário pode especificar os sistemas de interesse dele.

Figura 5.12: Definição dos tipos de tratamento de efluentes

Para criar um novo sistema de tratamento de efluentes, basta clicar em “New” e colocar o sistema de tratamento desejado no “Treatment types”, como por exemplo, lagoa de estabilização. O “Treatment methods” indica a concentração (mg/l) de vários constituintes das águas residuárias para cada esquema de tratamento. Porém este valor indica uma média anual e, para indicar a concentração de cada fonte de lançamento de esgoto, basta dar uma série de distribuição. Por exemplo: se a concentração média de DBO anual no efluente de uma determinada cidade é 50 mg/l e a série de distribuição informa que o valor de janeiro é 1,1, implica que a concentração de DBO no efluente lançado no rio é 55 mg/l.

As fontes não pontuais de poluição estão associadas com as áreas da bacia e podem ser expressas por concentração ou fluxo de massa. Quando são expressas por concentração, a massa total é proporcional ao escoamento específico. Caso contrário, a massa total é independente do escoamento específico e a concentração é maior durante períodos de menor escoamento.

- *Transporte nos arcos:*

As equações do modelo de qualidade da água são solucionadas para cada arco do sistema de rios. Dois diferentes métodos para calcular a velocidade do escoamento podem ser usados. Em ambos, assume-se que a área da seção transversal do rio é retangular, ou seja, é definida apenas pela profundidade e largura.

- 1) Primeira opção - o tempo de residência (t) e a profundidade da água (d) são especificados pelo usuário. Dado o comprimento do arco (L), a velocidade de escoamento (v) pode ser calculada como:

$$v = \frac{L}{t} \quad (17)$$

- 2) Segunda opção - o usuário define a largura da seção (w) e os parâmetros da curva chave:

$$Q = ah^b \quad (18)$$

onde Q é a vazão, h é a profundidade, a e b são parâmetros. A partir da eq. (18), a profundidade da água será:

$$h = \exp\left(\frac{\log\left(\frac{Q}{a}\right)}{b}\right) \quad (19)$$

Desta forma, a velocidade do escoamento é calculada por:

$$v = \frac{Q}{h \cdot w} \quad (20)$$

5.2. LEVANTAMENTO DE DADOS

Os resultados apresentados por modelos matemáticos devem ser precisos e representativos e, portanto, deve-se conhecer o sistema a ser simulado e os dados de entrada tão bem quanto for possível. Serão apresentados os dados principais necessários ao modelo de simulação, relacionados às sub-bacias do Alto Sapucaí, Médio Sapucaí e Baixo Sapucaí.

5.2.1. Dados fluviométricos

O rio Sapucaí-Mirim é o principal rio constituinte da bacia. Será simulado e estudado todo o seu curso, os conflitos causados pelo uso múltiplo da água, a poluição de suas águas e a adequação da qualidade da água para os usos a ela conferidos. Ter-se-á uma idéia da quantidade e qualidade da água que desemboca no rio Grande. O Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE fornece dados fluviométricos de 11 postos que foram operados no rio.

A Tabela 5.1 relaciona os postos fluviométricos e os anos em que foram medidas as vazões, enquanto que a Figura 5.13 mostra a localização destes postos. Esta figura foi editada no ArcView 3.1 a partir das informações fornecidas pela Agência Nacional das Águas.

Tabela 5.1: Relação dos postos fluviométricos (sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí)

<i>Posto</i>	<i>Nome</i>	<i>Rio</i>	<i>Ano</i>
1	Santo Antônio da Alegria	Ribeirão do Pinheirinho	1960 até 1999
2	Cobiça	Rio Sapucaí-Mirim	1967 até 1983
3	Fazenda Nossa Senhora das Graças	Rio Sapucaí-Mirim	1966 até 1981
4	Usina Dourados	Rio Sapucaí-Mirim	1937 até 1977
5	Fazenda Velha	Rio Sapucaí-Mirim	1929 até 1946
6	Buriti	Ribeirão do Buriti	1980 até 1997
7	Sítio Cachoeira	Ribeirão do Salgado	1980 até 1996
8	Sítio Santa Fé	Rio Sapucaí-Mirim	1971 até 1981
9	Pioneiros	Rio Sapucaí-Mirim	1944 até 1970
10	Guará	Ribeirão da Estiva	1981 até 1999
11	Fazenda São Domingos	Rio Sapucaí-Mirim	1938 até 1978

Fonte: Banco de dados DAEE

Figura 5.13: Localização dos postos fluviométricos no curso do rio Sapucaí-Mirim

A primeira tarefa foi escolher com quais postos dever-se-ia trabalhar. A dificuldade encontrada logo de início foi que a grande maioria destes postos possui um grande número de falhas nas medidas, não tendo dados de vazões de vários meses ou anos.

A proposta de trabalho é gerenciar, na atualidade, todo o curso do rio Sapucaí-Mirim. Escolheram-se, então, postos com maior consistência de dados e cuja localização abrangesse todo o curso do rio. Como vários postos não têm dados atuais, fez-se geração de séries sintéticas. Para utilizar o modelo de geração de séries temporais, devem ser escolhidos postos que tenham medidas em períodos coincidentes. Portanto, foram selecionados os postos fluviométricos Santo Antônio da Alegria, localizado no município de Santo Antônio da Alegria, Usina Dourados, situado em São José da Bela Vista, Pioneiros, localizado nas proximidades de São Joaquim da Barra e Fazenda São Domingos, em Guaíra.

5.2.1.1. Preenchimento de falhas

Como o Posto Pioneiros possuía maior consistência nos dados, foi tomado como referência e trabalhou-se com os quatro postos no período comum de 1945 a 1970. A Tabela 5.2 apresenta o período de falhas dos postos Santo Antônio da Alegria, Usina Dourados e Fazenda São Domingos.

Tabela 5.2: Falha nos postos fluviométricos no período de 1945 a 1970

<i>Posto</i>	<i>Período com falhas</i>
Santo Antônio da Alegria	1945 a 1959 e março 1966 a dezembro de 1966
Usina Dourados	Janeiro 1945 a janeiro 1953
Fazenda São Domingos	1945 e janeiro 1960 a setembro 1964

Não foi feito um preenchimento de falhas rigoroso, mas foi estabelecida uma relação linear entre as vazões do posto Pioneiros com os demais. A primeira relação linear foi feita entre os postos Pioneiros e Santo Antônio da Alegria. A Figura 5.14 mostra a relação linear entre os dados de vazão destes dois postos no período comum de 1960 a 1965. O mesmo procedimento foi feito para os outros postos (Figuras 5.15 e 5.16). As séries de vazões dos postos Usina Dourados e Fazenda São Domingos tiveram o ajuste linear feito, em comparação com o posto Pioneiros, no período de 1955 a 1970 e 1946 a 1959, respectivamente. Tudo isto também foi feito para as séries de vazões mínimas mensais (Figuras 5.17 a 5.19).

Figura 5.14: Relação linear entre as vazões médias dos postos Pioneiros e Santo Antônio da Alegria

Figura 5.15: Relação linear entre as vazões médias dos postos Pioneiros e Usina Dourados

Figura 5.16: Relação linear entre as vazões médias dos postos Pioneiros e Fazenda São Domingos

Figura 5.17: Relação linear entre as vazões mínimas dos postos Pioneiros e Santo Antônio da Alegria

Figura 5.18: Relação linear entre as vazões mínimas dos postos Pioneiros e Usina Dourados

Figura 5.19: Relação linear entre as vazões mínimas dos postos Pioneiros e Fazenda São Domingos

A Tabela 5.3 sumariza as regressões lineares das várias séries de vazão.

Tabela 5.3: Regressões lineares dos vários postos fluviométricos com relação a Pioneiros

Postos	Regressão linear	Série de Vazões
Santo Antônio da Alegria X Pioneiros	$y = -0,17492 + 0,09973 x$	Média
Usina Dourados X Pioneiros	$y = -6,22579 + 0,82337 x$	Média
Fazenda São Domingos X Pioneiros	$y = 8,77812 + 1,25571 x$	Média
Santo Antônio da Alegria X Pioneiros	$y = 0,21376 + 0,07623 x$	Mínima
Usina Dourados X Pioneiros	$y = -4,0458 + 0,80909 x$	Mínima
Fazenda São Domingos X Pioneiros	$y = 10,87139 + 1,24245 x$	Mínima

Através da equação do ajuste da reta, foram preenchidas as falhas nas séries de vazões médias e mínimas nos períodos mostrados na Tabela 5.2. No caso, a incógnita x da regressão linear era o dado de vazão do Posto Pioneiros existente no mesmo período de falha.

É de suma importância destacar que os dados fluviométricos fornecidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE são dados medidos diretamente no rio, conforme informações obtidas de pessoas deste órgão. Porém, no modelo de geração de séries

temporais são necessários dados de vazões naturais, uma vez que os eventos de chuvas e vazões naturais têm ocorrências equiprováveis. Diferentemente, nas vazões medidas em um determinado ponto são descartadas as demandas a montante do ponto de medição que aumentam progressivamente ao longo do tempo, dependendo do crescimento populacional e do desenvolvimento da região.

Isto foi mais um motivo para selecionar os postos fluviométricos. Foram escolhidos dados de vazão no período de 1945 a 1970, período no qual a irrigação, uso com maior demanda de água, não era significativa. Considerou-se, então, as séries como sendo de vazões naturais.

5.2.2. Usos e demanda dos recursos hídricos

As sub-bacias do Alto Sapucaí, Médio Sapucaí e Baixo Sapucaí compreendem uma área de 5045,81 km², cujos municípios estão relacionados na Tabela 5.4. A população estimada para as três sub-bacias é de aproximadamente 518864 habitantes.

Tabela 5.4: Sub-bacias e municípios com respectivas áreas totais

<i>Sub-Bacia</i>	<i>Município</i>	<i>Área Total (km²)</i>	<i>Área na Sub-Bacia (%)</i>
Alto Sapucaí	Batatais	464,64	22
	Franca	200,55	9
	Itirapuã	164,20	8
	Patrocínio Paulista	608,08	28
	Restinga	26,50	1
	Santo Antônio da Alegria	230,10	11
Total		2151,44	100
Médio Sapucaí	Batatais	148,92	14
	Franca	218,47	21
	Guará	2,30	0,22
	Nuporanga	163,57	15
	Restinga	219,57	21
	Ribeirão Corrente	35,24	3
	São José da Bela Vista	271,75	26

Tabela 5.4 (continuação): Sub-bacias e municípios com respectivas áreas totais

<i>Sub-Bacia</i>	<i>Município</i>	<i>Área Total (km²)</i>	<i>Área na Sub-Bacia (%)</i>
Total		1059,82	100
Baixo Sapucaí	Guaíra	155,80	8
	Guará	361,42	20
	Ipuã	418,50	23
	Ituverava	193,29	11
	Miguelópolis	247,45	13
	Nuporanga	120,73	7
	São Joaquim da Barra	290,67	16
	São José da Bela Vista	5,80	0,32
Total		1834,55	100

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

Os dados referentes às demandas de água foram obtidos através das informações contidas no Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000), Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP e Serviço Autônomo de Esgoto - SAE. Consideraram-se apenas as captações superficiais efetuadas nos rios compreendidos nas sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí.

5.2.2.1. Abastecimento urbano e industrial

As demandas de água oriundas de captação superficial para abastecimento urbano de cada município estão na Tabela 5.5. Nas três sub-bacias em estudo foram identificadas apenas quatro captações de água para uso industrial. Na Tabela 5.6 encontram-se estas indústrias e suas respectivas demandas pelo recurso hídrico.

Tabela 5.5: Captação superficial para abastecimento urbano das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí

<i>Município</i>	<i>Consumo (m³/s)</i>
Batatais	0,0944
Franca	0,05
Ipuã	0,0417
São Joaquim da Barra	0,1273
São José da Bela Vista	0,0278

Tabela 5.6: Captação superficial para abastecimento industrial das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí

<i>Município</i>	<i>Indústria</i>	<i>Demanda (m³/s)</i>	<i>Período (horas/dia)</i>	<i>Demanda média mensal (m³/mês)</i>
Batatais	Usina Batatais	0,0010	5	540
	S. A. Açúcar e Álcool			
Batatais	Usina Batatais	0,0653	24	169257,6
	S. A. Açúcar e Álcool			
Patrocínio	Central	0,0019	24	4924,8
Paulista	Energética Vale do Sapucaí Ltda			
São Joaquim da Barra	Destilaria Alta Mogiana Ltda	0,0133	24	34473,6

5.2.2.2. Irrigação

Foi encontrada 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. De acordo com o Plano Estadual dos Recursos Hídricos (1990), a estimativa de uso da água para irrigação no Estado de São Paulo é da ordem de 0,327 l/s/ha. Considerando a área irrigada da sub-bacia do Alto Sapucaí que, segundo o Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000), é de 77,58 km², implica numa demanda de 2,54 m³/s.

Verifica-se que a demanda cadastrada corresponde a apenas 14,17% do total estimado para a sub-bacia do Alto Sapucaí, confirmando-se a deficiência do cadastro de usuários. Como tentativa de tornar o dado da demanda para irrigação mais realista foi feito contato com a Casa da Agricultura de Franca e Miguelópolis, Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT de Franca, mas as informações foram desanimadoras, uma vez que não há cadastro relativo ao consumo de água.

5.2.2.3. Geração de Energia Elétrica

O rio Sapucaí-Mirim não possui grandes usinas hidrelétricas, mas as Pequenas Centrais Hidrelétricas de Dourados e São Joaquim, ambas de propriedade da Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL, têm a capacidade de produzir aproximadamente 18,75 MW.

- *PCH Dourados*: A Pequena Central Hidrelétrica de Dourados localiza-se no município de Nuporanga, na Fazenda Cachoeira, próximo ao km 8 da estrada intermunicipal Nuporanga - São José da Bela Vista. Foi inaugurada em 1926 com uma capacidade instalada de 6,4 MW, sofrendo, em 2002, uma repotenciação feita pela CPFL. Opera a fio d'água e, atualmente, possui uma unidade geradora do tipo Francis Vertical, cuja capacidade instalada é de 10,8 MW. Os dados principais desta PCH estão na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Dados principais da PCH Dourados

<i>Dados</i>	<i>PCH Dourados</i>
N. A. Montante (m)	587,34
N. A. Jusante (m)	557,26
Área do reservatório (km ²)	2,70
Volume acumulado total (hm ³)	0,035
Potência instalada (MW)	10,8
Energia assegurada (MW)	7,76
Vazão turbinada total (m ³ /s)	44

- *PCH São Joaquim*: A PCH São Joaquim foi construída no ano de 1911 com uma potência instalada de 5,52 MW. Situa-se no município de Guará na Fazenda Santa Cruz, próximo ao km 9,0 da estrada municipal São Joaquim da Barra - São José da Bela Vista. Como ocorreu com a PCH Dourados, a CPFL fez a repotenciação da PCH São Joaquim e hoje esta

pequena central possui uma capacidade instalada de 8,05 MW, trabalhando a fio d'água com 3 unidades geradoras do tipo Tubular S. Os principais dados da PCH São Joaquim estão na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Dados principais da PCH São Joaquim

<i>Dados</i>	<i>PCH São Joaquim</i>
N. A. Montante (m)	582,65
N. A. Jusante (m)	554,80
Área do reservatório (km ²)	0,93
Volume acumulado total (hm ³)	2,00
Potência instalada (MW)	8,05
Energia assegurada (MW)	5,63
Vazão turbinada total (m ³ /s)	55

- *PCHs Palmeiras, Anhangüera e Retiro*: O local de implantação das PCHs Palmeiras, Anhangüera e Retiro situa-se no curso do rio Sapucaí, no seu trecho entre os municípios de São Joaquim da Barra e Guará. A tabela 5.9 mostra os dados principais destas três PCHs.

Tabela 5.9: Dados principais das PCH's Palmeiras, Anhangüera e Retiro

<i>Dados</i>	<i>PCH Palmeiras</i>	<i>PCH Anhangüera</i>	<i>PCH Retiro</i>
N. A. Montante (m)	556,00	540,50	523,00
N. A. Jusante (m)	542,73	523,10	509,82
Área do reservatório (km ²)	2,67	2,00	3,13
Volume 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
Número de unidades geradoras	2	2	2
Tipo de unidade geradora	Kaplan	Kaplan S	Kaplan

5.2.3. Lançamento de Efluentes Domésticos e Industriais

Foram identificados nove pontos de lançamento de efluentes domésticos no rio Sapucaí-Mirim correspondentes aos municípios de Santo Antônio da Alegria, Patrocínio Paulista, Batatais, Itirapuã, Franca, São Joaquim da Barra e Guará. Destes, apenas Itirapuã e Franca fazem a coleta e tratamento de esgoto. A Tabela 5.10 relaciona os municípios e o tipo de sistema de tratamento de efluentes utilizado com sua respectiva eficiência, adotada a partir de valores teóricos conforme mencionado no Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000). Já a Tabela 5.11 indica as cargas orgânicas potenciais e remanescentes e a vazão de lançamento de cada cidade.

Tabela 5.10: Relação dos municípios que lançam efluentes domésticos no rio Sapucaí-Mirim e seus respectivos sistemas de tratamento

<i>Município</i>	<i>Tipo de tratamento</i>	<i>Eficiência (%)</i>
Batatais	Nenhum	-
Franca	Lagoa anaeróbia	85
Franca	Lodo ativado convencional	80
Franca	Fossa filtro	70
Guará	Nenhum	-
Itirapuã	Lagoa anaeróbia, facultativa e de maturação	85
Patrocínio Paulista	Nenhum	-
Santo Antônio da Alegria	Nenhum	-
São Joaquim da Barra	Nenhum	-

Tabela 5.11: Carga orgânica potencial e remanescente lançada por município

<i>Município</i>	<i>Carga orgânica potencial (kg DBO/dia)</i>	<i>Carga orgânica remanescente (kg DBO/dia)</i>	<i>Concentração de DBO remanescente (mg/l)</i>	<i>Vazão (m³/s)</i>
Batatais	2486	2486	393,61	0,0731
Franca	786	118	29,24	0,0467
Franca	11731	2346	39,10	0,6944
Franca	650	195	58,02	0,0389
Guará	566	566	248,14	0,0264
Itirapuã	273	41	36,22	0,0131
Patrocínio Paulista	566	566	471,29	0,0139
Santo Antônio da Alegria	294	294	872,51	0,0039
São Joaquim da Barra	2161	2161	275,76	0,0907

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

5.3. MODELAGEM DE SÉRIES TEMPORAIS

De acordo com SALAS (1980), dados estocásticos gerados através da modelagem de séries temporais podem ser usados em alguns estudos da mesma forma que os dados históricos. Ainda, esses dados possuem as mesmas propriedades estatísticas e diferentes valores dependentes da série original.

A modelagem de séries temporais é usada para: (1) reproduzir séries históricas, de forma que as principais características estatísticas das séries geradas sejam “parecidas” com as da série original. Em outras palavras, gerar-se-á eventos equiprováveis, ou séries sintéticas. (2) previsão de séries hidrológicas futuras.

Os vários métodos para geração de séries sintéticas foram largamente difundidos nos anos 60 e têm sido utilizados em vários estudos, pois permitem testar a solução ótima obtida a partir da série histórica para diversos cenários hidrológicos equiprováveis.

Segundo SALAS (1980), para se modelar séries temporais é preciso definir um modelo matemático que represente séries com propriedades semelhantes. Os modelos podem ser: Modelo Autoregressivo (AR), Modelo Autoregressivo Média Móvel (ARMA), Modelo

Autoregressivo Integrado Média Móvel (ARIMA), Fraction Gaussian Noise (FGN), Broken Line (BL), Shifting Level (SL). Os modelos mais comumente utilizados são os modelos autoregressivos.

A geração das variáveis de vazão do rio foi feita através do modelo estacionário multivariado autoregressivo de primeira ordem AR(1).

Os modelos autoregressivos são atrativos em hidrologia principalmente porque consideram em sua formulação a dependência da variável no tempo (o valor da variável no tempo presente depende do valor da mesma em tempos posteriores) e são de fácil aplicação. Já os modelos multivariados consideram a dependência das variáveis no espaço.

5.3.1. Modelo Estacionário Multivariado Autoregressivo de Primeira Ordem AR (1)

Em um processo estacionário, as propriedades estatísticas não se alteram com o tempo, embora as séries temporais correspondentes possam ser diferentes entre si. Deste modo, o primeiro passo para a aplicação do modelo AR (1) é a sazonalização da série histórica. As variáveis a serem consideradas são:

$X_1(t)$: série de vazões no Posto Fluviométrico 1

$X_2(t)$: série de vazões no Posto Fluviométrico 2

$X_3(t)$: série de vazões no Posto Fluviométrico 3

$X_4(t)$: série de vazões no Posto Fluviométrico 4

O comportamento periódico das séries históricas originais foi descrito através do ajuste à função logarítmica neperiana para que pudessem ser empregadas na normalização das variáveis. Portanto:

$$Y_i(t) = \ln X_i(t) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (21)$$

onde $Y_i(t)$ é a série uniforme das variáveis $X_i(t)$.

A normalização das variáveis foi feita através da seguinte expressão:

$$Z_i(t) = \frac{Y_i(t) - \bar{Y}_i(t)}{\sigma_i(t)} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (22)$$

onde $Y_i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$, já foram definidas anteriormente, $\bar{Y}_i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$, são as médias de cada variável, $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$, $\sigma_3(t)$, $\sigma_4(t)$, são os desvios padrões das variáveis $Y_i(t)$ e Z_i

(t), $Z_2(t)$, $Z_3(t)$, $Z_4(t)$ são as variáveis de vazão normalizada, média zero e desvio padrão um, para o mês t, a serem utilizadas no modelo AR (1).

O modelo AR (1) foi primeiramente proposto por MATALAS (1967) para ser aplicado em hidrologia. Considerar uma série multivariada estacionária $z_i(t)$, $i = 1, \dots, n$ onde n é o número de séries temporais ou variáveis. Sem perda de generalidade, assumir que $z_i(t)$ possui todos os valores normalizados com média zero e desvio padrão um, ou $E\{z_i(t)\} = 0$ e $\text{Var}\{z_i(t)\} = 1$ para $i = 1, \dots, n$. O modelo AR (1) das séries $z_i(t)$ pode ser expresso na forma matricial por:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Z}(t-1) + \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(t) \quad (23)$$

onde $\mathbf{Z}(t)$ são $(n \times 1)$ vetores dos elementos $z_i(t)$ da série histórica, $\mathbf{A}$ e $\mathbf{B}$ são $(n \times n)$ matrizes paramétricas, e $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ é um $(n \times 1)$ vetor independente de números aleatórios com distribuição normal, média zero e desvio padrão um. O vetor de números aleatórios $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ é não-correlacionado no tempo e espaço, isto é, $E[\varepsilon_i(t) \varepsilon_j(t)] = 0$ para $i \neq j$ ou $E[\varepsilon_i(t) \varepsilon_i^T(t)] = I$ onde T denota a matriz transposta e I é a matriz identidade. A eq. (23) pode ser escrita na seguinte forma expandida:

$$\begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \\ \vdots \\ Z_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1(t-1) \\ Z_2(t-1) \\ \vdots \\ Z_n(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1(t) \\ \varepsilon_2(t) \\ \vdots \\ \varepsilon_n(t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

A estrutura de correlação de $\mathbf{Z}(t)$ evidenciadas nas eq. (23) e eq. (24) indicam uma correlação de ordem zero e um no espaço, e uma correlação serial de ordem um no tempo.

Os parâmetros matriciais $\mathbf{A}$ e $\mathbf{B}$ foram obtidos através do método dos momentos (MATLAS, 1967).

Multiplicando a eq. (23) por $\mathbf{Z}^T(t)$ e rearranjando, obtém-se:

$$E[\mathbf{Z}(t) \cdot \mathbf{Z}^T(t)] = \mathbf{A} \cdot E[\mathbf{Z}(t-1) \cdot \mathbf{Z}^T(t)] + \mathbf{B} \cdot E[\boldsymbol{\varepsilon}(t) \cdot \mathbf{Z}^T(t-1) \cdot \mathbf{A}^T + \boldsymbol{\varepsilon}^T(t) \cdot \mathbf{B}^T] \quad (25)$$

Define-se matriz de covariância, $\mathbf{M}_0$, como:

$$\mathbf{M}_0 = E[\mathbf{Z}(t) \cdot \mathbf{Z}^T(t)] \quad (26)$$

e $\mathbf{M}_1$, como:

$$\mathbf{M}_1^T = E[\mathbf{Z}(t-1) \cdot \mathbf{Z}^T(t)] \quad (27)$$

Explorando as propriedades de $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$, a eq. (24) pode ser reduzida para:

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_1^T + \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}^T \quad (28)$$

A eq. (28) relaciona os momento $\mathbf{M}_0$ e $\mathbf{M}_1$ com as matrizes paramétricas $\mathbf{A}$ e $\mathbf{B}$. Multiplicando-se a eq. (23) por $\mathbf{Z}^T(t-1)$, os valores esperados definem a covariância de atraso 1:

$$E[\mathbf{Z}(t) \cdot \mathbf{Z}^T(t-1)] = \mathbf{A} \cdot E[\mathbf{Z}(t-1) \cdot \mathbf{Z}^T(t-1)] + \mathbf{B} \cdot E[\varepsilon(t) \cdot \mathbf{Z}^T(t-1)] \quad (29)$$

Novamente, com as propriedades de $\varepsilon(t)$, a eq. (29) passa a ser:

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_0 \quad (30)$$

onde a estacionariedade do sistema estabelece que:

$$E[\mathbf{Z}(t) \cdot \mathbf{Z}^T(t)] = E[\mathbf{Z}(t-1) \cdot \mathbf{Z}^T(t-1)] = \mathbf{M}_0 \quad (31)$$

Desta forma, a matriz $\mathbf{A}$ pode ser determinada pela eq. (32):

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_0^{-1} \quad (32)$$

Para calcular o parâmetro $\mathbf{B}$, foi utilizada a metodologia descrita por BRAS & RODRÍGUEZ-ITURBE (1985). A partir da eq. (28):

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}^T = \mathbf{M}_0 - \mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_1^T = \mathbf{D} \quad (33)$$

onde $\mathbf{B}$ é uma matriz triangular inferior que, no caso desta pesquisa, onde foram trabalhadas 4 variáveis, pode ser representado como se segue:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Multiplicando-se $\mathbf{B}$, exposto na eq. (34), pela sua transposta, ter-se-á:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} b_{11}b_{11} & b_{11}b_{21} & b_{11}b_{31} & b_{11}b_{41} \\ b_{21}b_{11} & b_{21}^2 + b_{22}^2 & b_{21}b_{31} + b_{22}b_{32} & b_{21}b_{41} + b_{22}b_{42} \\ b_{31}b_{11} & b_{31}b_{21} + b_{32}b_{22} & b_{31}^2 + b_{32}^2 + b_{33}^2 & b_{31}b_{41} + b_{32}b_{42} + b_{33}b_{43} \\ b_{41}b_{11} & b_{41}b_{21} + b_{42}b_{22} & b_{41}b_{31} + b_{42}b_{32} + b_{43}b_{33} & b_{41}^2 + b_{42}^2 + b_{43}^2 + b_{44}^2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Os valores de $\mathbf{B}$ são então obtidos através de uma sequência de equações algébricas.

Após a determinação das matrizes paramétricas $\mathbf{A}$ e $\mathbf{B}$, foram geradas as séries sintéticas para cada posto fluviométrico através das seguintes equações, deduzidas da eq. (24):

$$\mathbf{Z}_1 = a_{11}\mathbf{Z}_1(t-1) + a_{12}\mathbf{Z}_2(t-1) + a_{13}\mathbf{Z}_3(t-1) + a_{14}\mathbf{Z}_4(t-1) + b_{11}\varepsilon_1(t) \quad (36)$$

$$Z_2 = a_{21}Z_1(t-1) + a_{22}Z_2(t-1) + a_{23}Z_3(t-1) + a_{24}Z_4(t-1) + b_{21}\varepsilon_1(t) + b_{22}\varepsilon_2(t) \quad (37)$$

$$Z_3 = a_{31}Z_1(t-1) + a_{32}Z_2(t-1) + a_{33}Z_3(t-1) + a_{34}Z_4(t-1) + b_{31}\varepsilon_1(t) + b_{32}\varepsilon_2(t) + b_{33}\varepsilon_3(t) \quad (38)$$

$$Z_4 = a_{41}Z_1(t-1) + a_{42}Z_2(t-1) + a_{43}Z_3(t-1) + a_{44}Z_4(t-1) + b_{41}\varepsilon_1(t) + b_{42}\varepsilon_2(t) + b_{43}\varepsilon_3(t) + b_{44}\varepsilon_4(t) \quad (39)$$

Para calcular os parâmetros do modelo, $Z_i(t-1)$, $i = 1, 2, 3, 4$, foram obtidos dos valores das séries históricas. Agora, para a geração das séries, foi dado o valor zero como valor inicial para $Z_1(t-1)$, $Z_2(t-1)$, $Z_3(t-1)$ e $Z_4(t-1)$. Ainda, por razões práticas, foram descartados os dez primeiros anos gerados. Os valores de $\varepsilon_i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$, foram gerados com o auxílio da ferramenta Análise de Dados (opção Geração de Números Aleatórios) da planilha eletrônica Excel (Microsoft), na qual também foi feita toda a geração das séries.

Os resíduos das séries $Z_1(t)$, $Z_2(t)$, $Z_3(t)$ e $Z_4(t)$ foram determinados através das expressões:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{Z_1(t) - a_{11}Z_1(t-1) - a_{12}Z_2(t-1) - a_{13}Z_3(t-1) - a_{14}Z_4(t-1)}{b_{11}} \quad (40)$$

$$\varepsilon_2(t) = \frac{Z_2(t) - a_{21}Z_1(t-1) - a_{22}Z_2(t-1) - a_{23}Z_3(t-1) - a_{24}Z_4(t-1) - b_{21}\varepsilon_1(t)}{b_{22}} \quad (41)$$

$$\varepsilon_3(t) = [Z_3(t) - a_{31}Z_1(t-1) - a_{32}Z_2(t-1) - a_{33}Z_3(t-1) - a_{34}Z_4(t-1) - b_{31}\varepsilon_1(t) - b_{32}\varepsilon_2(t)]/b_{33} \quad (42)$$

$$\varepsilon_4(t) = [Z_4(t) - a_{41}Z_1(t-1) - a_{42}Z_2(t-1) - a_{43}Z_3(t-1) - a_{44}Z_4(t-1) - b_{41}\varepsilon_1(t) - b_{42}\varepsilon_2(t) - b_{43}\varepsilon_3(t)]/b_{44} \quad (43)$$

Os resíduos calculados foram testados quanto a sua normalidade através do cálculo dos seus coeficientes de assimetria, média e desvio padrão.

Foram geradas 6 séries de 55 anos cada, 4 para vazões médias mensais e 2 para vazões mínimas mensais.

6. MODELAGEM DAS SUB-BACIAS DO ALTO, MÉDIO E BAIXO SAPUCAÍ

6.1. AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS

CENÁRIO 1

A Figura 6.1 é a rede de fluxo usada no modelo MIKE BASIN. Ela representa a situação atual da configuração do rio Sapucaí-Mirim, as retiradas de água e os lançamentos de efluentes. Apesar de não possuir escala, estão contidas informações geográficas das cidades, rios, reservatórios, usinas hidrelétricas, postos fluviométricos, dentre outras informações que foram disponibilizadas na forma digital pela Agência Nacional das Águas – ANA³.

O Cenário 1 corresponde à modelagem das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí nos dias de hoje. As demandas de água são os dados cadastrados como descrito na metodologia e operam apenas as PCHs de Dourados e São Joaquim da Barra.

A Figura 6.2 é a mesma rede de fluxo, porém estão discriminados os nós do modelo e os esquemas de captação, lançamento e geração de energia, que podem ser conferidos na Tabela 6.1. No esquema, as informações relativas aos pontos de captação e lançamento e as pequenas centrais hidrelétricas foram consideradas conforme está no Capítulo 5.

³ HidroWeb – Sistemas de Informações Hidrológicas. Disponível em <http://www.ana.gov.br>

Figura 6.1: Cenário 1 – Situação atual

Figura 6.2: Rede de fluxo

Tabela 6.1: Descrição da rede de fluxo

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Representação</i>
N1	Nó simples	Nascente do rio Sapucaí-Mirim
N2	Nó de bacia	Posto fluviométrico Santo Antônio da Alegria
N3	Nó simples	Ponto de lançamento de efluentes
N4	Nó simples	Ponto de captação
N5	Nó simples	Ponto de captação
N6	Nó simples	Ponto de captação e lançamento
N7	Nó de bacia	Posto fluviométrico Usina Dourados
N8	Nó simples	Ponto de captação
N9	Nó de bacia	Posto fluviométrico Pioneiros
N10	Nó simples	Ponto de captação e lançamento
N11	Nó de bacia	Posto fluviométrico Fazenda São Domingos
N12	Nó simples	Confluência com o Rio Grande
II	Irrigação	Captação para irrigação de Patrocínio Paulista
A1	Abastecimento urbano e industrial	Lançamento de efluente doméstico de Santo Antônio da Alegria
A2	Abastecimento urbano e industrial	Captação para uso industrial de Patrocínio Paulista e Batatais
A3	Abastecimento urbano e industrial	Captação para uso urbano de Patrocínio Paulista, Batatais e Franca
A4	Abastecimento urbano e industrial	Lançamento de efluentes de Patrocínio Paulista, Batatais, Itirapuã e Franca
A5	Abastecimento urbano e industrial	Captação para uso urbano de São José da Bela Vista
A6	Abastecimento urbano e industrial	Captação para uso urbano de Ipuã e para uso urbano e industrial de São Joaquim da Barra
A7	Abastecimento urbano e industrial	Lançamentos de São Joaquim da Barra e Guará
R1	Reservatório	Reservatório de Dourados
R2	Reservatório	Reservatório de São Joaquim
H1	Hidrelétrica	PCH Dourados
H2	Hidrelétrica	PCH São Joaquim

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.

Os nós de bacia são locais onde existem dados de vazões observadas e representam pontos de entrada de escoamento específico. A área em verde representa a área de drenagem de cada nó. Considerou-se a área unitária e a série de escoamento específico como sendo a série de vazões observadas. Neste primeiro cenário a simulação foi feita com a série sintética 1 de vazões médias mensais.

Como as usinas trabalham a fio d'água, considerou-se o volume dos reservatórios constante ao longo de todo período de simulação, ou seja, os reservatórios de Dourados e São Joaquim mantêm seus volumes de $0,035 \text{ hm}^3$ e $2,00 \text{ hm}^3$, respectivamente. Neste cenário, as usinas operam 24 horas por dia na sua capacidade instalada. A PCH Dourados deve gerar 10,8 MW, enquanto que a PCH São Joaquim deve gerar 8,05 MW. Foi escolhida a opção "Standard Reservoir".

Dados de precipitação e evapotranspiração potencial foram adquiridos através dos arquivos eletrônicos de balanço hídrico do Estado de São Paulo do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento⁴. Nestes arquivos são informadas as médias mensais dos dados de interesse para cada município do Estado. No caso, consultaram-se os municípios nos quais situam-se os reservatórios, ou melhor, Nuporanga e Guará.

Com relação aos índices de qualidade da água, simularam-se apenas OD e DBO. Por este motivo os parâmetros Y_d , k_d , k_6 foram considerados nulos, uma vez que eles se referem à massa de nitrogênio contido por unidade de massa de DBO, constante cinética de decomposição da amônia e nitrato, respectivamente. As informações referentes às cargas pontuais de poluição só levam em consideração a matéria orgânica descrita em termos de kg DBO/dia. R, P e B receberam o valor zero porque se considerou apenas a reaeração através da interface ar-água.

Segundo BALDOCHI (2002), o valor médio da literatura do coeficiente de desoxigenação k_{d3} a 20°C varia de 0,35 a 0,45. Adotou-se o valor de 0,35 por representar uma situação mais crítica, menor capacidade de remoção da matéria orgânica.

A Figura 6.3 mostra a tela do MIKE BASIN onde foi feita a declaração dos parâmetros.

⁴ Arquivos de Balanço Hídrico de São Paulo. Disponível em <http://www.masrv54.agricultura.gov.br>

Figura 6.3: Declaração dos parâmetros do modelo de qualidade da água

Por motivos de simplificações na rede de fluxo, considerou-se que nenhum lançamento de efluentes possui tratamento e a carga orgânica despejada no rio é a residual. A Figura 6.4 mostra a tela da escolha do tipo de tratamento para o esquema A4.

Figura 6.4: Declaração do tipo de tratamento e da carga orgânica residual

Como mostra a Tabela 6.1, o esquema A4 corresponde ao lançamento de efluentes de Patrocínio Paulista, Batatais, Itirapuã e Franca.

De acordo com a Tabela 5.11, Patrocínio Paulista e Batatais não possuem nenhum tipo de tratamento de efluentes e juntos, lançam 864,9 mg/l de DBO. Já Franca e Itirapuã emitem 162,58 mg/l de DBO remanescente. Totalizando, 1027,48 mg/l de DBO são lançados no rio Sapucaí-Mirim no nó N6. Considerações semelhantes foram feitas para os demais esquemas de lançamento.

Com relação ao transporte nos arcos, foi utilizada a segunda opção (eq. 18), uma vez que o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE disponibiliza as curvas chaves dos postos fluviométricos⁵.

A simulação foi feita de janeiro de 1980 a dezembro de 2003 e este intervalo foi escolhido para todos os cenários subsequentes.

⁵ Banco de Dados Fluviométricos do Estado de São Paulo. Disponível em <http://www.dace.sp.gov.br>

CENÁRIO 2

A rede de fluxo do Cenário 2 é a mesma utilizada no Cenário 1. A única diferença deste cenário em comparação com o anterior é a consideração feita na produção de energia elétrica. Simulou-se a situação atual das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí com as PCHs Dourados e São Joaquim produzindo, respectivamente, 72% e 70% da potência instalada, valor equivalente à energia assegurada.

Esta segunda simulação foi feita com a mesma série sintética do Cenário 1, uma vez que o objetivo foi avaliar a qualidade da água quando menos energia é gerada, ou melhor, quando os reservatórios liberam mais água para os nós à jusante.

CENÁRIO 3

A rede de fluxo do Cenário 3 continua sendo a mesma. Neste cenário avaliou-se o desempenho do sistema com uma demanda de água para irrigação (esquema II) diferente.

A série sintética de vazões médias mensais 2 são os dados de entrada dos nós de bacia N2, N7, N9 e N11 e das séries de escoamento específico.

As usinas operam com 100% de suas capacidades e a demanda no esquema II é de 2,54 m³/s, valor atribuído conforme especificado no item 5.2.2.2.

CENÁRIO 4

A situação aqui é a mesma do Cenário 1, a única diferença é que a simulação foi feita com a série sintética de vazões mínimas mensais 1, para avaliar o desempenho do sistema nas situações críticas.

CENÁRIO 5

No Cenário 5 foi considerado que as cidades que não possuem tratamento de esgoto comecem a tratar seus efluentes domésticos com um sistema com 80% de eficiência de remoção da matéria orgânica, como as lagoas de estabilização, lagoas facultativas e lagoas em geral. São

estes os municípios referidos: Santo Antônio da Alegria, Patrocínio Paulista, Batatais, São Joaquim da Barra e Guará.

Por exemplo, o esquema A4 corresponde a um lançamento de 1027,48 mg/l de DBO. Neste esquema, Patrocínio Paulista e Batatais não possuem estação de tratamento de esgoto e seus respectivos lançamentos correspondem a 471,29 mg/l e 393,61 mg/l de DBO. Se estas duas cidades implantarem um sistema com 80% de eficiência, a concentração de DBO residual será de 94,26 mg/l e 78,72 mg/l. Juntamente com Franca e Itirapuã são lançados 335,56 mg/l de DBO residual no nó N6.

Foram utilizadas as séries sintéticas de vazões médias mensais 1.

CENÁRIO 6

Este cenário compreende a situação futura do rio Sapucaí-Mirim quando as cinco PCHs estiverem operando (Figura 6.5). Considerou-se que as PCHs Dourados, São Joaquim, Palmeiras, Anhangüera e Retiro devem produzir as suas respectivas potências instaladas. Como as cinco usinas trabalham a fio d'água, o volume de cada reservatório permaneceu constante.

Foram utilizadas as séries sintéticas de vazões médias mensais 3.

A Figura 6.6 mostra a rede de fluxo utilizada no modelo MIKE BASIN para o cenário planejado. A descrição de cada nó e de cada esquema está na Tabela 6.2.

Figura 6.5: Cenário planejado

Figura 6.6: Rede de fluxo do cenário planejado

Tabela 6.2: Descrição da rede de fluxo do cenário planejado

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Representação</i>
N1	Nó simples	Nascente do rio Sapucaí-Mirim
N2	Nó de bacia	Posto fluviométrico Santo Antônio da Alegria
N3	Nó simples	Ponto de lançamento de efluentes
N4	Nó simples	Ponto de captação
N5	Nó simples	Ponto de captação
N6	Nó simples	Ponto de captação e lançamento
N7	Nó de bacia	Posto fluviométrico Usina Dourados
N8	Nó simples	Ponto de captação
N9	Nó simples	Vazão liberada pela usina
N10	Nó de bacia	Posto fluviométrico Pioneiros
N11	Nó simples	Vazão liberada pela usina
N12	Nó simples	Ponto de captação e lançamento
N13	Nó simples	Posto fluviométrico Fazenda São Domingos
N14	Nó simples	Confluência com o Rio Grande
II	Irrigação	Captação para irrigação de Patrocínio Paulista
A1	Abastecimento urbano e industrial	Lançamento de efluente doméstico de Santo Antônio da Alegria
A2	Abastecimento urbano e industrial	Captação para uso industrial de Patrocínio Paulista e Batatais
A3	Abastecimento urbano e industrial	Captação para uso urbano de Patrocínio Paulista, Batatais e Franca
A4	Abastecimento urbano e industrial	Lançamento de efluentes de Patrocínio Paulista, Batatais, Itirapuã e Franca
A5	Abastecimento urbano e industrial	Captação para uso urbano de São José da Bela Vista
A6	Abastecimento urbano e industrial	Captação para uso urbano de Ipuã e para uso urbano e industrial de São Joaquim da Barra
A7	Abastecimento urbano e industrial	Lançamentos de São Joaquim da Barra e Guará
R1	Reservatório	Reservatório de Dourados
R2	Reservatório	Reservatório de São Joaquim
R3	Reservatório	Reservatório Palmeiras
R4	Reservatório	Reservatório Anhangüera
R5	Reservatório	Reservatório Retiro

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Representação</i>
H1	Hidrelétrica	PCH Dourados
H2	Hidrelétrica	PCH São Joaquim
H3	Hidrelétrica	PCH Palmeiras
H4	Hidrelétrica	PCH Anhangüera
H5	Hidrelétrica	PCH Retiro

As considerações relativas à captação e lançamento dos esquemas II, A1, A2, A3, A4, A5, A6 e A7 são as mesmas do Cenário 1.

CENÁRIO 7

A diferença do Cenário 6 com o Cenário 7 é que este último foi simulado com a série sintética de vazões mínimas mensais 2.

CENÁRIO 8

A rede de fluxo do Cenário 8 é a mesma utilizada no Cenário 6. Neste cenário foi considerado que os municípios de Santo Antônio da Alegria, Patrocínio Paulista, Batatais, São Joaquim da Barra e Guará implantaram sistema de tratamento de esgoto com 80% de eficiência. As considerações são equivalentes ao Cenário 5.

7. RESULTADOS

7.1. GERAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÕES

Após o preenchimento das falhas nos dados de vazão dos postos fluviométricos de Santo Antônio da Alegria, Usina Dourados, Pioneiros e Fazenda São Domingos, foi possível, conforme descrito no Capítulo 5, gerar as séries sintéticas de vazões. Foram geradas quatro séries de vazões médias mensais e duas de vazões mínimas mensais. O procedimento da geração foi feito no Excel (Microsoft).

7.1.1. Parâmetros do modelo AR(1) para as séries de vazões médias mensais

O primeiro passo da geração de séries sintéticas foi determinar, a partir dos dados observados, os parâmetros do modelo AR(1). Após o procedimento de normalização das variáveis, foram calculadas as covariâncias das séries com atraso zero e com atraso um, de acordo com eq. (26) e eq. (27), para montagem das matrizes M_0 e M_1 . Estas matrizes são representadas como segue:

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0,919026 & 0,951953 & 0,903031 \\ 0,919026 & 1 & 0,947071 & 0,873276 \\ 0,951953 & 0,947071 & 1 & 0,936881 \\ 0,903031 & 0,873276 & 0,936881 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0,811475 & 0,765832 & 0,801193 & 0,775665 \\ 0,769557 & 0,817127 & 0,799176 & 0,754033 \\ 0,801437 & 0,801211 & 0,835828 & 0,808531 \\ 0,772105 & 0,750114 & 0,802087 & 0,852527 \end{bmatrix}$$

Pela eq. (32), obtém-se a matriz A:

$$A = \begin{bmatrix} 0,500063 & 0,005376 & 0,170348 & 0,159787 \\ -0,032995 & 0,605977 & 0,148138 & 0,115841 \\ 0,012609 & 0,121289 & 0,501885 & 0,221003 \\ -0,011825 & 0,022567 & 0,014007 & 0,83036 \end{bmatrix}$$

Após o cálculo da matriz A, obtém-se a matriz D pela eq. (33):

$$D = \begin{bmatrix} 0,329671 & 0,273183 & 0,275302 & 0,240041 \\ 0,273183 & 0,324495 & 0,27052 & 0,226623 \\ 0,275303 & 0,270521 & 0,294539 & 0,245198 \\ 0,240041 & 0,226623 & 0,245198 & 0,273063 \end{bmatrix}$$

A matriz paramétrica B é finalmente obtida pela decomposição da matriz D, de acordo com o que está exposto na eq. (35).

$$B = \begin{bmatrix} 0,57417 & 0 & 0 & 0 \\ 0,475788 & 0,313242 & 0 & 0 \\ 0,479478 & 0,135327 & 0,215236 & 0 \\ 0,418066 & 0,088469 & 0,152262 & 0,259371 \end{bmatrix}$$

7.1.2. Geração das séries de vazões médias mensais

Foram geradas quatro séries de 80 anos cada. As Figuras 7.1 a 7.4 apresentam uma geração para os quatro postos fluviométricos no período de 1945 a 1970. Pode-se observar que os valores modelados acompanham o comportamento das séries observadas.

Figura 7.1: Comparação das séries de vazões observadas e geradas do posto Santo Antônio da Alegria

Figura 7.2: Comparação das séries de vazões observadas e geradas do posto Usina Dourados

Figura 7.3: Comparação das séries de vazões observadas e geradas do posto Pioneiros

Figura 7.4: Comparação das séries de vazões observadas e geradas do posto Fazenda São Domingos

7.1.3. Análise dos resíduos das séries sintéticas de vazões médias mensais

Foram calculados os ruídos brancos das séries $Z_1(t)$, $Z_2(t)$, $Z_3(t)$ e $Z_4(t)$, denominados $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$, $\varepsilon_3(t)$ e $\varepsilon_4(t)$, a partir das matrizes paramétricas A e B e das eq. (40) a (43). Segundo YEVJEVICH (1971), a verificação da fidedignidade do modelo em relação às variáveis em estudo pode ser analisada através da média, desvio padrão e coeficiente de assimetria das séries dos resíduos, apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Análise estatística dos ruídos brancos das séries $Z_1(t)$, $Z_2(t)$, $Z_3(t)$ e $Z_4(t)$

Parâmetro	$\varepsilon_1(t)$	$\varepsilon_2(t)$	$\varepsilon_3(t)$	$\varepsilon_4(t)$
Média	0,0080827	0,0256839	0,0079174	-0,01033
Desvio Padrão	0,9900193	0,9879365	1,0174155	1,029533
Coeficiente de Assimetria	0,0122969	-0,069334	0,0462389	0,0501032

Pelos resultados apresentados na Tabela 7.1, verifica-se que os resíduos das três séries em análise apresentam tendência à normalidade, uma vez que seus coeficientes de assimetria tendem a zero e as médias e os desvios padrões tendem a zero e um, respectivamente. Esta distribuição normal pode ser visualizada nas Figuras 7.5 a 7.8, nas quais estão apresentados os histogramas para as quatro séries em estudo.

Figura 7.5: Histograma dos ruídos brancos de $Z_1(t)$

Figura 7.6: Histograma dos ruídos brancos de $Z_2(t)$

Figura 7.7: Histograma dos ruídos brancos de $Z_3(t)$

Figura 7.8: Histograma dos ruídos brancos de $Z_4(t)$

7.1.4. Parâmetros do modelo AR(1) para as séries de vazões mínimas mensais

O procedimento para obtenção dos parâmetros do modelo AR(1) das séries de vazões mínimas foi o mesmo adotado para a geração das séries de vazões médias. Desta forma, as matrizes M_0 , M_1 , A , D e B são representadas como segue:

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0,812282 & 0,864785 & 0,787922 \\ 0,812282 & 1 & 0,922974 & 0,816871 \\ 0,864785 & 0,922974 & 1 & 0,874379 \\ 0,787922 & 0,816871 & 0,874379 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0,74314 & 0,713359 & 0,747031 & 0,715339 \\ 0,693128 & 0,808337 & 0,775578 & 0,714174 \\ 0,726603 & 0,77367 & 0,80635 & 0,760886 \\ 0,690782 & 0,708819 & 0,759306 & 0,851792 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0,352138 & 0,113534 & 0,152607 & 0,211684 \\ 0,039251 & 0,612632 & 0,069422 & 0,122086 \\ 0,078642 & 0,176635 & 0,383709 & 0,219109 \\ 0,035589 & -0,00209 & 0,036918 & 0,793162 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0,391894 & 0,206894 & 0,236961 & 0,16801 \\ 0,206893 & 0,336548 & 0,271607 & 0,198807 \\ 0,236959 & 0,271606 & 0,330081 & 0,216864 \\ 0,168007 & 0,198804 & 0,216862 & 0,273256 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,626014 & 0 & 0 & 0 \\ 0,330492 & 0,476784 & 0 & 0 \\ 0,37852 & 0,307284 & 0,303941 & 0 \\ 0,268376 & 0,230939 & 0,145793 & 0,355868 \end{bmatrix}$$

7.1.5. Geração das séries de vazões mínimas mensais

Geraram-se 2 séries de 80 anos cada. As Figuras 7.9 a 7.12 apresentam uma geração para os quatro postos fluviométricos no período de 1945 a 1970. Pode-se observar que os valores modelados acompanham o comportamento das séries observadas.

Figura 7.9: Comparação das séries de vazões mínimas observadas e geradas do posto Santo Antônio da Alegria

Figura 7.10: Comparação das séries de vazões mínimas observadas e geradas do posto Usina Dourados

Figura 7.11: Comparação das séries de vazões mínimas observadas e geradas do posto Pioneiros

Figura 7.12: Comparação das séries de vazões mínimas observadas e geradas do posto Fazenda São Domingos

7.1.6. Análise dos resíduos das séries sintéticas de vazões mínimas mensais

Da mesma forma que para as séries geradas das vazões médias mensais, foram calculados os ruídos brancos, $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$, $\varepsilon_3(t)$ e $\varepsilon_4(t)$, das séries desazonalizadas $Z_1(t)$, $Z_2(t)$, $Z_3(t)$ e $Z_4(t)$ das vazões mínimas mensais. A Tabela 7.2 apresenta a média, desvio padrão e coeficiente de assimetria das séries dos resíduos e percebe-se que os resíduos das três séries em análise apresentam tendência à normalidade, uma vez que seus coeficientes de assimetria tendem a zero e as médias e os desvios padrões tendem a zero e um, respectivamente.

Tabela 7.2: Análise estatística dos ruídos brancos das séries desazonalizadas de vazões mínimas mensais

Parâmetro	$\varepsilon_1(t)$	$\varepsilon_2(t)$	$\varepsilon_3(t)$	$\varepsilon_4(t)$
Média	-0,03181	-0,05834	0,076793	0,008348
Desvio Padrão	0,95646	0,966961	1,006968	0,991163
Coeficiente de Assimetria	0,1431496	0,0417972	-0,015688	0,0079938

As Figuras 7.13 a 7.16 apresentam os histogramas dos ruídos brancos, nos quais é possível averiguar que os mesmos possuem a forma característica da distribuição normal.

Figura 7.13: Histograma dos ruídos brancos de $Z_1(t)$ (vazões mínimas)

Figura 7.14: Histograma dos ruídos brancos de $Z_2(t)$ (vazões mínimas)

Figura 7.15: Histograma dos ruídos brancos de $Z_3(t)$ (vazões mínimas)

Figura 7.16: Histograma dos ruídos brancos de $Z_4(t)$ (vazões mínimas)

7.2. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 1

A Figura 7.17 apresenta os índices de satisfação e déficit no atendimento da demanda para irrigação (esquema II). Esta demanda, de $0,0036 \text{ m}^3/\text{s}$, foi 100% atendida em todo o período de simulação. Este resultado pode também ser conferido na Tabela 7.3 que sumariza as médias mensais do índice de satisfação.

Figura 7.17: Satisfação e déficit no atendimento de II – Cenário 1

Tabela 7.3: Índices de satisfação média mensal para o esquema II – Cenário 1

II - Satisfação (%) – Cenário 1													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
II	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

O fato da demanda ser 100% atendida no período de simulação ocorreu também para todos os esquemas de abastecimento urbano e industrial, como pode ser observado na Tabela 7.4 e nas Figuras 7.18 a 7.21.

Tabela 7.4: Índices de satisfação média mensal para os esquemas A2, A3, A5 e A6 – Cenário 1

<i>Abastecimento urbano e industrial - Satisfação (%) - Cenário 1</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
A2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Figura 7.18: Satisfação e déficit no atendimento de A2 – Cenário 1

Figura 7.19: Satisfação e déficit no atendimento de A3 – Cenário 1

Figura 7.20: Satisfação e déficit no atendimento de A5 – Cenário 1

Figura 7.21: Satisfação e déficit no atendimento de A6 – Cenário 1

Estes resultados indicam que as demandas de água nas sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí estão condizentes com a disponibilidade hídrica das mesmas. Em termos de quantidade, esta afirmação é válida, porém, avaliou-se a qualidade da água que de acordo com os resultados apresentados adiante, a situação destas três sub-bacias não é tão cômoda assim.

Quanto à geração de energia, a PCH Dourados (esquema H1) produz em 82,48% do período de simulação a sua capacidade instalada de 10,8 MW, como mostra a Figura 7.22 e Tabela 7.5. Esta PCH produz energia acima de sua capacidade assegurada (7,76 MW) em 69,79% do tempo.

Figura 7.22: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H1 – Cenário 1

Tabela 7.5: Índice de satisfação média mensal para o esquema H1 – Cenário 1

H1 - Satisfação (%) – Cenário 1													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	97,95	100	100	100	99,57	94,2	74,58	56,5	47,85	52,09	74,4	92,66	82,48

A Tabela 7.6 relaciona a energia média mensal gerada no esquema H1 e o déficit na produção de energia é mostrado na Tabela 7.7.

Tabela 7.6: Energia gerada em H1 – Cenário 1

<i>H1 – Energia gerada (MW) – Cenário 1</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
H1	10,58	10,8	10,8	10,8	10,75	10,17	8,06	6,1	5,17	5,63	8,04	10,0	8,91

Tabela 7.7: Déficit médio mensal de H1 – Cenário 1

<i>H1 – Déficit de energia (MW) – Cenário 1</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
H1	0,22	0	0	0	0,05	0,63	2,76	4,7	5,63	5,18	2,77	0,79	1,89

Pela Tabela 7.6, percebe-se que de agosto a outubro a usina não consegue gerar sua capacidade assegurada de 7,76 MW. Isto ocorre logo após o período seco, no qual o reservatório trabalha para manter a vazão mínima a sua jusante (nó N8) considerada como sendo a $Q_{7,10}$, cujo valor é $3,46 \text{ m}^3/\text{s}$. Na Tabela 7.8 estão os valores da vazão liberada para a usina e para o nó N8, onde há captação de água para abastecimento urbano.

A escolha de que o reservatório deve liberar pelo menos a $Q_{7,10}$ deve-se ao fato de que, se ao menos existir esta vazão no rio, a demanda para abastecimento urbano do esquema A5 será suprida, uma vez que seu valor é de $0,0278 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 7.8: Vazão média mensal liberada por R1 para H1 e N8 – Cenário 1

R1 – Vazão liberada (m³/s) – Cenário 1													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	43,26	43,18	42,51	42,51	42,33	40,31	32,87	26,25	22,48	24,75	35,58	43,85	36,66
N8	44,22	82,56	94,48	52,54	24,08	12,09	4,47	3,51	3,51	3,46	4,0	16,7	28,8

No período de seca, o reservatório R1 libera apenas o fluxo mínimo exigido porque foi admitida a hidrelétrica como prioridade, uma vez que a demanda do nó N8 está sendo atendida.

Já a PCH São Joaquim (esquema H2) produz, com uma satisfação de 86,26%, a sua potência instalada (8,05 MW). A energia média gerada no período de simulação é de 6,94 MW e em 77,78% do tempo de simulação, o esquema H2 produz acima da energia assegurada (5,63 MW). A Figura 7.23 e as Tabelas 7.9 e 7.10 resumizam estes resultados.

Figura 7.23: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H2 – Cenário 1

Tabela 7.9: Índice de satisfação média mensal para o esquema H2 – Cenário 1

H2 - Satisfação (%) – Cenário 1													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H2	99,43	100	100	100	100	97,77	83,5	64,19	52,94	58,96	82,73	95,6	86,26

Tabela 7.10: Energia gerada em H2 – Cenário 1

<i>H2 – Energia gerada (MW) – Cenário 1</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
H2	8,0	8,05	8,05	8,05	8,05	7,87	6,72	5,17	4,26	4,75	6,66	7,7	6,94

O déficit na produção de energia em H2 é mostrado na Tabela 7.11.

Tabela 7.11: Déficit médio mensal de H2 – Cenário 1

<i>H2 – Déficit de energia (MW) – Cenário 1</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
H2	0,05	0	0	0	0	0,18	1,33	2,88	3,79	3,3	1,39	0,35	1,11

Como ocorre com H1, o período crítico é o trimestre agosto, setembro e outubro. Novamente, o reservatório precisa liberar a vazão mínima, agora adotada a $Q_{7,10}$ de 5,99 m³/s. H2 foi considerada prioridade de R2 porque as demandas a jusante do reservatório são atendidas.

Na Tabela 7.12 estão os valores da vazão liberada para a hidrelétrica e para o nó N9.

Tabela 7.12: Vazão média mensal liberada por R2 para H2 e N9 – Cenário 1

R2 – Vazão liberada (m³/s) – Cenário 1													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H2	34,46	34,53	34,23	34,23	34,23	33,46	28,97	26,25	22,48	24,75	35,58	43,85	36,66
N9	52,99	91,18	102,74	60,8	32,16	18,92	8,36	6,53	6,34	6,15	8,4	25,44	35,0

Com relação à qualidade da água, a situação é mais preocupante. O primeiro nó analisado é o N3, no qual é lançado o esgoto doméstico de Santo Antônio da Alegria. A concentração média de DBO a 20 °C no período simulado é de 0,67 mg/l de O₂ e a de OD é de 6,31 mg/l de O₂. A Figura 7.24 mostra o comportamento da DBO e OD entre 1980 a 2003. A Tabela 7.13 relaciona as médias mensais destes parâmetros.

Figura 7.24: Concentração de OD e DBO no nó N3 – Cenário 1

Tabela 7.13: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N3 – Cenário 1

<i>N3 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 1</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
DBO	0,36	0,25	0,26	0,37	0,5	0,63	0,86	1,09	1,38	1,06	0,74	0,52	0,67
OD	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31

Pelos resultados da Tabela 7.13 percebe-se que a concentração dos parâmetros DBO e OD estão dentro dos limites estabelecidos para a classificação da água Classe 2, na qual a DBO a 20 °C deve ser até 5 mg/l de O₂ e OD superior a 5 mg/l de O₂.

A evolução da concentração de OD e DBO no nó N4 é representada na Figura 7.25. Neste nó há captação de água para irrigação e a concentração de OD se mantém em 6,31 mg/l, já a concentração de DBO a 20 °C cai para 0,66 mg/l de O₂, como pode ser observado na Tabela 7.14.

Figura 7.25: Concentração de OD e DBO no nó N4 – Cenário 1

Como foi visto, a concentração de OD nos nós N3, N4 e N5 permanece constante, o que ajuda a decomposição aeróbia da matéria orgânica nos meses secos, quando a concentração da DBO se eleva.

Até este último ponto, a qualidade da água está boa e, em todo este trecho, os parâmetros OD e DBO encontrados no rio Sapucaí-Mirim estão dentro do limite para a Classe 2. O problema tem início a partir do ponto N6 que recebe o lançamento de efluentes domésticos de Batatais, Itirapuã, Franca e Patrocínio Paulista.

Por ser um ponto que recebe uma elevada carga orgânica, o nó N6 apresenta uma péssima concentração de DBO (Figura 7.27 e Tabela 7.16).

Figura 7.27: Concentração de OD e DBO no nó N6 – Cenário 1

Tabela 7.16: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N6 – Cenário 1

<i>N6 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 1</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
DBO	87,7	63,6	65,4	89,7	117,6	144,3	188,5	225	263,1	223,9	165,4	121,7	146,3
OD	5,78	5,92	5,91	5,76	5,59	5,43	5,16	4,93	4,7	4,94	5,3	5,57	5,42

A Figura 7.28 e a Tabela 7.17 mostram os resultados obtidos para o nó N8, ponto de captação para uso urbano. A concentração média da DBO no período simulado é de 9,98 mg/l de O₂, enquanto que a de OD é de 6,24 mg/l de O₂. De maio a dezembro, as concentrações de DBO estão superiores a 5 mg/l, o que não condiz com o enquadramento deste trecho do rio como Classe 2. Esta situação manteve-se em 68,4% do tempo de simulação.

Figura 7.28: Concentração de OD e DBO no nó N8 – Cenário 1

Tabela 7.17: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N8 – Cenário 1

N8 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 1													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
DBO	4,57	2,41	2,29	3,91	6,18	8,65	13,33	17,74	22,6	18,25	12,17	7,66	9,98
OD	6,3	6,33	6,33	6,31	6,28	6,25	6,2	6,16	6,12	6,15	6,21	6,26	6,24

Está indicado na rede de fluxo deste cenário (Figura 6.2) que há captação de água para uso doméstico neste ponto. Esta representação é simbólica e simplificada, uma vez que pelo balanço de massa, a retirada de água pode ser feita a montante do nó N8, mas a jusante do reservatório, sem que haja alteração no resultado.

Foi analisado o comportamento dos parâmetros de qualidade da água no nó N9 porque ele está à jusante da usina hidrelétrica e, nos cenários subsequentes, estudar-se-á se haverá melhora ou não na qualidade da água através de mudanças na produção de energia.

A Figura 7.29 e a Tabela 7.18 mostram que as concentrações médias da DBO e do OD são, respectivamente, 2,81 mg/l de O_2 e 6,3 mg/l de O_2 . Apenas nos meses de agosto, setembro e outubro a concentração da DBO esteve acima de 5 mg/l. Em apenas 17,01% do tempo simulado a concentração da DBO esteve acima de 5 mg/l e em 23,26% do tempo abaixo de 1 mg/l.

Figura 7.29: Concentração de OD e DBO no nó N9 – Cenário 1

Tabela 7.18: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N9 – Cenário 1

N9 – Concentração de OD e DBO ₅ (mg/l) – Cenário 1													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
DBO	1,17	0,53	0,49	0,97	1,67	2,5	3,93	5,17	6,34	5,3	3,53	2,17	2,81
OD	6,34	6,36	6,36	6,34	6,32	6,3	6,27	6,25	6,24	6,25	6,38	6,31	6,3

Novamente, os resultados apresentados na Figura 7.30 e da Tabela 7.19 são ruins, pois refletem a situação do nó N10, no qual é lançado o esgoto urbano de São Joaquim da Barra e Guará, mas vale a mesma consideração feita para o nó N8.

Figura 7.30: Concentração de OD e DBO no nó N10 – Cenário 1

Tabela 7.19: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N10 – Cenário 1

<i>N10 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 1</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
DBO	28,4	19,7	18,8	26,2	34,9	43,1	58,1	71,6	83,0	73,2	53,8	40,1	45,9
OD	6,0	6,13	6,14	6,04	5,92	5,81	5,62	5,45	5,31	5,43	5,67	5,85	5,78

O nó N12 representa a confluência do rio Sapucaí-Mirim com o rio Grande e através da Figura 7.31 e Tabela 7.20 percebe-se como é ruim a qualidade da água em termos de DBO.

Figura 7.31: Concentração de OD e DBO no nó N12 – Cenário 1

Tabela 7.20: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N12 – Cenário 1

N12 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 1													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
DBO	12,9	8,85	8,45	11,8	16,0	20,1	26,8	33,0	38,0	34,5	25,5	18,6	21,2
OD	6,10	6,18	6,18	6,12	6,05	5,97	5,86	5,76	5,69	5,74	5,88	6,0	5,96

7.3. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 2

A satisfação na demanda para os diversos usos da água não foi interferida neste cenário (Tabela 7.21). O objetivo, agora, é avaliar a geração de energia e a qualidade da água.

Tabela 7.21: Índices de satisfação média mensal – Cenário 2

<i>Irrigação e abastecimento urbano e industrial - Satisfação (%) - Cenário 2</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
I1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

A PCH Dourados produz, em 91,44% do tempo, a capacidade assegurada, gerando em média, 7,11 MW. Em 94,44% do período de simulação a satisfação esteve acima de 50% (Figura 7.32 e Tabela 7.22).

Figura 7.32: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H1 – Cenário 2

Tabela 7.22: Índice de satisfação média mensal para o esquema H1 – Cenário 2

H1 - Satisfação (%) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	100	100	100	100	100	100	93,36	78,5	65,07	72,26	90,7	97,42	91,44

A Tabela 7.23 relaciona a energia média mensal gerada no esquema H1 e o déficit na produção de energia é mostrado na Tabela 7.24.

Tabela 7.23: Energia gerada em H1 – Cenário 2

H1 – Energia gerada (MW) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,78	7,26	6,1	5,06	5,62	7,05	7,58	7,11

Tabela 7.24: Déficit médio mensal de H1 – Cenário 2

H1 – Déficit de energia (MW) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	0	0	0	0	0	0	0,52	1,67	2,72	2,16	0,72	0,2	0,67

Na Tabela 7.25 encontram-se as vazões liberadas pelo reservatório R1 para H1 e N8.

Tabela 7.25: Vazão média mensal liberada por R1 para H1 e N8 – Cenário 2

R1 – Vazão liberada (m³/s) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	31,09	30,61	30,61	30,61	30,61	30,61	28,58	24,85	21,28	24,18	30,75	31,64	28,76
N8	56,47	95,28	106,4	64,45	35,71	21,41	8,70	5,15	4,81	4,07	8,51	29,15	36,68

Já a PCH São Joaquim gerou, com 94% de satisfação, sua capacidade assegurada (5,63 MW). A energia média produzida pela usina foi de 5,3 MW e em 96,53% do tempo de simulação a satisfação esteve acima de 50%. Estes resultados podem ser conferidos na Figura 7.33 e nas Tabelas 7.26 e 7.27.

Figura 7.33: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H2 – Cenário 2

Tabela 7.26: Índice de satisfação média mensal para o esquema H2 – Cenário 2

H2 - Satisfação (%) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H2	100	100	100	100	100	100	96,98	84,4	70,71	80,79	96,42	98,63	94,0

Tabela 7.27: Energia gerada em H2 – Cenário 2

H2 – Energia gerada (MW) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H2	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,47	4,76	3,99	4,55	5,43	5,56	5,3

O déficit na produção de energia em H2 é mostrado na Tabela 7.28.

Tabela 7.28: Déficit médio mensal de H2 – Cenário 2

H2 – Déficit de energia (MW) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H2	0	0	0	0	0	0	0,17	0,88	1,65	1,08	0,2	0,08	0,34

Na Tabela 7.29 estão os valores da vazão liberada para a hidrelétrica e para o nó N9.

Tabela 7.29: Vazão média mensal liberada por R2 para H2 e N9 – Cenário 2

R2 – Vazão liberada (m³/s) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H2	24,17	23,96	23,96	23,96	23,96	23,96	23,23	20,61	17,61	20,72	24,8	24,36	22,94
N9	63,36	101,9	113,0	71,07	42,34	28,04	14,02	9,37	8,45	7,5	14,43	36,39	42,49

Em comparação com o Cenário 1, ocorreram poucas mudanças nos resultados obtidos para o nó N8 (Figura 7.34 e Tabela 7.30). A concentração média da DBO diminuiu para 9,8 mg/l, enquanto que a concentração de OD subiu apenas um centésimo. Em apenas 34,38% do intervalo de simulação a concentração de DBO esteve abaixo de 5 mg/l. Já a concentração de OD manteve-se acima de 5 mg/l em todo o período de 1980 a 2003. Apesar da boa concentração de OD, a concentração da DBO esteve abaixo de 10 mg/l em 61,1% da simulação, indicando que este trecho do rio enquadra-se melhor como Classe 3.

Figura 7.34: Concentração de OD e DBO no nó N8 – Cenário 2

Tabela 7.30: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N8 – Cenário 2

<i>N8 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 2</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
DBO	4,35	2,27	2,16	3,69	5,85	8,34	13,16	17,68	22,55	18,23	12,03	7,33	9,8
OD	6,3	6,34	6,33	6,31	6,28	6,26	6,2	6,16	6,12	6,15	6,21	6,27	6,25

Os valores das concentrações da DBO e do OD simulado para o nó N9 são, respectivamente, de 2,65 mg/l e 6,31 mg/l (Figura 7.35 e Tabela 7.31). A concentração de DBO esteve abaixo de 5 mg/l em 82,64% do período simulado.

Figura 7.35: Concentração de OD e DBO no nó N9 – Cenário 2

Tabela 7.31: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N9 – Cenário 2

<i>N9 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 2</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
DBO	0,99	0,45	0,41	0,82	1,41	2,18	3,73	5,09	6,28	5,25	3,32	1,89	2,65
OD	6,34	6,36	6,36	6,35	6,33	6,31	6,28	6,26	6,24	6,25	6,29	6,32	6,31

Novamente, por estar recebendo efluentes, os resultados apresentados para o nó N10 não são bons, como está na Figura 7.36 e na Tabela 7.32.

Figura 7.36: Concentração de OD e DBO no nó N10 – Cenário 2

Tabela 7.32: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N10 – Cenário 2

N10 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
DBO	28,3	19,6	18,7	26,1	34,7	43,0	57,8	71,3	82,8	73,1	53,8	39,8	45,8
OD	6,01	6,13	6,14	6,04	5,93	5,82	5,63	5,46	5,32	5,43	5,68	5,86	5,79

Os resultados do nó N12 estão apresentados na Figura 7.37 e na Tabela 7.33.

Figura 7.37: Concentração de OD e DBO no nó N12 – Cenário 2

Tabela 7.33: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l, no nó N12 – Cenário 2

N12 – Concentração de OD e DBO (mg/l) – Cenário 2													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
DBO	12,8	8,81	8,42	11,8	15,9	20,0	26,7	32,9	37,9	34,4	25,5	18,5	21,1
OD	6,11	6,18	6,19	6,13	6,05	5,98	5,86	5,76	5,69	5,74	5,88	6,01	5,96

Em comparação com o Cenário 1, não se justifica a redução na produção de energia, uma vez que não houve melhora significativa na qualidade da água. Observando a geração média de cada pequena central hidrelétrica, o esquema H1 gera 20,2% a menos no Cenário 2 e H2 gera 23,6% a menos do que no Cenário 1, enquanto que as concentrações de DBO e OD se mantêm praticamente iguais.

7.4. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 3

O Cenário 3 mostra outra realidade das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí, quando é considerada a demanda para irrigação estimada pelo Plano Estadual dos Recursos Hídricos (1990). Neste caso, a disponibilidade hídrica é menor que a demanda, uma vez que há falhas no atendimento da irrigação (esquema I1) e comprometimento do abastecimento industrial de Batatais e Patrocínio Paulista (esquema A2). As outras captações superficiais de água continuam com 100% de satisfação durante os anos de 1980 a 2003. Estes resultados estão resumidos nas Figura 7.38 e 7.39 e na Tabela 7.34.

Figura 7.38: Satisfação e déficit no atendimento de I1 – Cenário 3

Figura 7.39: Satisfação e déficit no atendimento de A2 – Cenário 3

Tabela 7.34: Índices de satisfação média mensal – Cenário 3

Irrigação e abastecimento urbano e industrial - Satisfação (%) - Cenário 3													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
II	100	100	100	100	100	100	99,4	94,6	85,4	93,9	99,8	100	97,8
A2	100	100	100	100	100	100	85,6	66,7	41,6	65,4	89,3	100	87,4
A3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

A PCH Dourados produz em 76,4% do período de simulação a sua capacidade instalada, como mostra a Figura 7.40 e Tabela 7.35. Esta PCH produz energia acima de sua capacidade assegurada (7,76 MW) em 61,81% do tempo.

Figura 7.40: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H1 – Cenário 3

Tabela 7.35: Índice de satisfação média mensal para o esquema H1 – Cenário 3

H1 - Satisfação (%) – Cenário 3													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	92,4	99,3	98,2	98,0	94,8	84,9	70,7	47,7	39,1	44,7	65,2	81,5	76,4

A Tabela 7.36 relaciona a energia média mensal gerada no esquema H1 e o déficit na produção de energia é mostrado na Tabela 7.37.

Tabela 7.36: Energia gerada em H1 – Cenário 3

H1 – Energia gerada (MW) – Cenário 3													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	9,98	10,7	10,6	10,6	10,2	9,17	7,63	5,15	4,22	4,82	7,04	8,81	8,25

Tabela 7.37: Déficit médio mensal de H1 – Cenário 3

<i>H1 – Déficit de energia (MW) – Cenário 3</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
H1	0,82	0,08	0,20	0,22	0,56	1,63	3,17	5,65	6,58	5,98	3,76	1,99	2,55

O esquema H2 produz energia com 80,2% de satisfação, gerando em média 6,46 MW. A energia assegurada (5,63 MW) é produzida em 68,75% do tempo simulado (Figura 7.41 e Tabela 7.38 e 7.39).

Figura 7.41: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H2 – Cenário 3

Tabela 7.38: Índice de satisfação média mensal para o esquema H2 – Cenário 3

H2 - Satisfação (%) – Cenário 3													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	94,5	100	99,0	99,7	98,0	91,3	77,4	52,9	42,5	49,3	72,8	84,9	80,2

Tabela 7.39: Energia gerada em H2 – Cenário 3

<i>H2 – Energia gerada (MW) – Cenário 3</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
H1	7,61	8,05	7,97	8,03	7,89	7,35	6,23	4,26	3,42	3,97	5,86	6,83	6,46

Com relação ao Cenário 1, houve uma redução na produção de energia de 7,4% para H1 e 6,92% para H2.

As concentrações das variáveis de qualidade da água variaram em decorrência da simulação ter sido feita com outra série sintética e da diminuição da disponibilidade hídrica no trecho inicial do rio. Na Tabela 7.40 estão as concentrações médias de DBO e OD para cada nó analisado.

Tabela 7.40: Concentrações médias mensais de OD e DBO, em mg/l – Cenário 3

<i>Nó</i>	<i>DBO</i>	<i>OD</i>
N3	0,74	6,31
N4	0,74	6,31
N5	0,52	5,57
N6	366,5	4,06
N8	12,14	6,23
N9	3,25	6,3
N10	50,5	5,73
N12	23,1	5,93

Percebe-se, portanto, que o fato de não se ter dados corretos da demanda de água para irrigação pode interferir drasticamente no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

7.5. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 4

O Cenário 4 representa uma situação crítica nas sub-bacias, causada pela ocorrência das vazões mínimas. Todas as demandas cadastradas, tanto para irrigação como para abastecimento urbano e industrial foram 100% atendidas em todo o período de simulação, o que

evidencia que a oferta e demanda de água não é um problema nas sub-bacias estudadas. Novamente, deve-se analisar a geração de energia e a qualidade da água.

O grau de atendimento do esquema H1 foi de 67,2%. Os índices de satisfação nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro estiveram abaixo de 40%. A energia média gerada foi de 7,25 MW e em 49,31% do tempo gerou-se mais que 7,76MW. H2 gerou, com 70,3% de satisfação, a sua potência instalada. 5,66 MW foram em média produzidos e, em 55,9% do período simulado a PCH São Joaquim gerou mais que a energia assegurada.

As Tabelas 7.41 e 7.42 resumem, respectivamente, as concentrações médias de DBO e OD simuladas para os nós N3, N4, N5, N8, N9 e N12.

Tabela 7.41: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 4

<i>Concentração de DBO (mg/l) – Cenário 4</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	5,24	0,43	0,43	0,54	0,71	0,86	1,19	1,76	2,43	2,24	1,55	1,32	1,56
N4	5,23	0,43	0,43	0,53	0,71	0,85	1,19	1,75	2,41	2,23	1,55	1,31	1,55
N5	5,21	0,43	0,42	0,53	0,70	0,85	1,18	1,75	2,41	2,22	1,54	1,30	1,55
N8	8,37	3,92	3,92	5,68	9,07	11,7	18,2	29,2	36,0	34,0	26,3	16,4	16,9
N9	2,41	1,00	0,95	1,47	2,54	3,41	5,27	7,66	9,16	8,99	7,02	5,03	4,58
N12	19,3	12,3	11,7	14,5	19,8	24,1	33,3	45,0	51,8	53,3	43,2	33,4	30,1

Tabela 7.42: Concentrações médias mensais de OD, em mg/l – Cenário 4

<i>Concentração de OD (mg/l) – Cenário 4</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	6,28	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,30	6,30	6,30	6,30	6,31	6,30
N4	6,28	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,30	6,30	6,30	6,30	6,31	6,30
N5	6,28	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,30	6,30	6,30	6,30	6,31	6,30
N8	6,27	6,31	6,31	6,29	6,24	6,22	6,15	6,06	6,01	6,02	6,09	6,17	6,18
N9	6,31	6,35	6,34	6,33	6,30	6,29	6,25	6,22	6,19	6,20	6,23	6,26	6,27
N12	5,99	6,12	6,12	6,07	5,98	5,91	5,76	5,78	5,47	5,45	5,60	5,76	5,82

A concentração média simulada de DBO no nó N3 foi de 1,56 mg/l sendo que, em 288 meses de simulação, em apenas 10 a concentração esteve acima de 5 mg/l. Já a concentração média de OD foi de 6,30 mg/l. O mesmo acontece com o nó N4 e N5. Já no nó N8, em apenas 41,32% do tempo de simulação a concentração de DBO esteve abaixo de 10 mg/l.

O nó N9 apresentou sua concentração de DBO abaixo de 5 mg/l e 10 mg/l em, respectivamente, 62,15% e 90,97% do tempo de simulação. A concentração de DBO em N12 esteve inferior a 10 mg/l em apenas 8,68% do tempo.

7.6. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 5

Visto que a qualidade da água não foi interferida pela operação dos reservatórios e que o rio Sapucaí-Mirim está se esgotando qualitativamente, simulou-se este cenário para notar as diferenças nos resultados se as cidades que não possuem estações de tratamento de esgoto implantassem algum sistema. Foi considerado que os municípios de Santo Antônio da Alegria, Patrocínio Paulista, Batatais, São Joaquim da Barra e Guará tratam seus efluentes domésticos com um sistema de tratamento que possua uma eficiência de 80%, como as lagoas de estabilização, lagoas facultativas e lagoas em geral. Nas Tabelas 7.43 e 7.44 estão os resultados desta simulação para os nós N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9, N10 e N12.

Tabela 7.43: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 5

<i>Concentração de DBO (mg/l) – Cenário 5</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	0,07	0,05	0,05	0,07	0,10	0,13	0,17	0,22	0,28	0,21	0,15	0,10	0,13
N4	0,07	0,05	0,05	0,07	0,10	0,12	0,17	0,22	0,27	0,21	0,15	0,10	0,13
N5	0,07	0,05	0,05	0,07	0,10	0,12	0,17	0,22	0,27	0,21	0,15	0,10	0,13
N6	28,6	20,7	21,3	29,2	38,4	47,0	61,5	73,4	85,8	73,0	53,9	39,7	47,7
N7	2,75	1,75	1,70	2,48	3,49	4,52	6,49	8,32	10,25	8,54	5,96	4,06	5,03
N8	1,49	0,79	0,75	1,28	2,01	2,82	4,35	5,79	7,37	5,95	3,97	2,50	3,26
N9	0,38	0,17	0,16	0,32	0,54	0,81	1,28	1,69	2,07	1,73	1,15	0,71	0,92
N10	5,82	3,99	3,82	5,36	7,17	8,90	12,1	14,9	17,3	15,2	11,2	8,26	9,49
N12	2,64	1,80	1,72	2,41	3,28	4,15	5,55	6,86	7,89	7,16	5,29	3,83	4,38

Em 100% do período de simulação, os nós N3, N4 e N5 apresentaram suas concentrações de DBO abaixo de 1 mg/l. As concentrações de DBO nos nós N7 e N8 foram menores que 5 mg/l em, respectivamente, 56,03% e 78,82% do tempo e manteve-se abaixo deste valor em todo o período de simulação em N9. Já N12 apresentou a DBO menor que 5 mg/l e 10 mg/l em, respectivamente, 65,97% e 97,92% do tempo.

A Tabela 7.44 mostra os resultados obtidos para o OD.

Tabela 7.44: Concentrações médias mensais de OD, em mg/l – Cenário 5

<i>Concentração de OD (mg/l) – Cenário 5</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31
N4	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31
N5	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31
N6	5,78	5,92	5,91	5,76	5,59	5,43	5,16	4,93	4,70	4,94	5,30	5,57	5,42
N7	6,26	6,28	6,28	6,26	6,24	6,22	6,18	6,14	6,12	6,14	6,19	6,23	6,21
N8	6,33	6,36	6,36	6,34	6,32	6,29	6,25	6,22	6,19	6,21	6,26	6,30	6,29
N9	6,36	6,37	6,37	6,36	6,35	6,33	6,31	6,29	6,28	6,29	6,31	6,34	6,33
N10	6,02	6,14	6,15	6,05	5,94	5,84	5,65	5,49	5,35	5,47	5,70	5,87	5,81
N12	6,14	6,21	6,21	6,16	6,09	6,02	5,92	5,82	5,75	5,80	5,94	6,04	6,01

7.7. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 6

Com as cinco PCHs em operação, o grau de atendimento dos esquemas I1, A2, A3, A5 e A6 foi de 100% em todo o período de simulação. Portanto, as demandas de água para irrigação e abastecimento urbano e industrial não foram comprometidas.

A PCH Dourados produziu, com 79,94% de satisfação, 10,8 MW. A energia média gerada no período de simulação foi 8,63 MW e, em 66,32% do tempo, a usina gerou acima da sua energia firme. Os piores resultados encontrados foram nos meses de agosto, setembro e outubro, nos quais a satisfação no atendimento foi de 49,7%, 39,3% e 48,0%, respectivamente.

A satisfação no atendimento da PCH São Joaquim foi de 83,4% e a energia média gerada foi de 6,71 MW. Em 73,26% do tempo a geração foi superior à energia assegurada.

A produção de energia da PCH Palmeiras foi atendida em 39,5% do período simulado. A geração média foi de 5,38 MW e, em 30,9% do tempo, o esquema H3 gerou mais que 6,91 MW. Já a geração de energia da PCH Anhangüera foi atendida em 72,4% do tempo, gerando em média 13,4 MW. Em 72,92% do tempo simulado, o esquema H4 gerou acima da energia assegurada (8,91 MW). A satisfação na produção de energia da PCH Retiro foi de 18,5% e a geração média foi de 2,66 MW.

As Tabelas 7.45 e 7.46 e as Figuras 7.42, 7.43 e 7.44 resumem estes resultados.

Tabela 7.45: Índices de satisfação média mensal para a geração de energia – Cenário 6

Geração de energia - Satisfação (%) – Cenário 6													
	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	7,31	6,05	7,23	11,0	18,4	18,5

Tabela 7.46: Energia gerada em cada esquema – Cenário 6

Energia média gerada (MW) – Cenário 6													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
H1	10,8	10,8	10,8	10,8	10,6	9,82	7,82	5,37	4,24	5,19	7,75	9,60	8,63
H2	8,05	8,05	8,05	8,05	8,01	7,68	6,51	4,48	3,45	4,35	6,40	7,46	6,71
H3	8,60	10,8	10,7	8,71	5,63	4,03	2,80	1,85	1,44	1,83	2,93	5,22	5,38
H4	17,7	18,5	18,5	18,3	16,8	14,9	10,7	7,28	5,95	7,12	10,8	14,4	13,4
H5	4,14	5,27	5,36	3,78	2,63	2,05	1,48	1,05	0,87	1,04	1,58	2,65	2,66

Figura 7.42: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H3 – Cenário 6

Figura 7.43: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H4 – Cenário 6

Figura 7.44: Satisfação, energia gerada e déficit no esquema H5 – Cenário 6

A Tabela 7.47 indica os resultados da simulação da qualidade da água para o parâmetro DBO e não houve mudança significativa. Nos nós N3, N4 e N5 a DBO esteve abaixo de 1 mg/l em, respectivamente, 78,82%, 79,51% e 79,86% da simulação. Em nenhum momento da simulação, a DBO esteve acima de 5 mg/l e a concentração média de OD foi 6,31 mg/l.

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

A concentração de DBO em N10 apresentou-se acima de 5 mg/l em 19,8% do tempo e o OD médio encontrado foi de 6,31 mg/l. Já no nó N11 isto ocorreu em 19,4% do tempo e o OD permaneceu o mesmo.

A DBO média na confluência com o rio Grande foi de 22,7 mg/l. Ainda alta, esta concentração se manteve acima de 10 mg/l em 78,47% do tempo.

Tabela 7.47: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 6

<i>Concentração de DBO (mg/l) – Cenário 6</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	0,32	0,25	0,27	0,36	0,50	0,64	0,88	1,26	1,59	1,15	0,77	0,57	0,71
N4	0,32	0,25	0,26	0,36	0,50	0,63	0,87	1,25	1,59	1,15	0,77	0,57	0,71
N5	0,32	0,25	0,26	0,36	0,49	0,63	0,87	1,24	1,58	1,14	0,76	0,56	0,71
N8	4,24	2,73	2,88	4,66	7,59	10,5	16,1	24,4	29,7	22,8	14,6	9,36	12,5
N9	2,49	1,41	1,50	2,74	4,97	7,38	11,9	18,7	23,1	17,5	10,8	6,53	9,09
N10	0,81	0,45	0,46	0,88	1,63	2,49	4,06	6,35	7,87	6,01	3,60	2,24	3,07
N11	0,80	0,44	0,46	0,87	1,61	2,46	4,02	6,29	7,80	5,95	3,56	2,22	3,04
N14	11,5	8,71	8,67	11,7	16,3	20,7	28,2	38,3	43,5	38,5	26,8	19,5	22,7

7.8. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 7

O Cenário 7 reflete uma situação de vazões mínimas mensais e as 5 PCH's em operação. Apenas o abastecimento industrial do esquema A2 foi comprometido, cujo grau de atendimento foi de 99,7%. A satisfação de cada esquema está relacionada na Tabela 7.48.

Os esquemas H1, H2, H3, H4 e H5 geraram as suas capacidades asseguradas em, respectivamente, 49,65%, 56,6%, 14,24%, 52,78% e 1,74% do tempo de simulação.

Tabela 7.48: Índices de satisfação média mensal – Cenário 7

<i>Satisfação (%) - Cenário 7</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
I1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A2	96,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,7
A3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
H1	68	93,3	96,8	96,7	90	79,4	65,8	47	40,9	34,5	39,6	53,2	67,1
H2	73,2	96,2	98,3	98,8	94	85,4	71,5	51,2	43,9	36,3	42,5	58,2	70,8
H3	25,9	50,5	56,7	48,1	36,3	25,3	19,3	13,1	11,1	9,1	10,7	15,4	26,8
H4	59,4	86,3	93,6	90,7	79,2	66,7	54,7	39,2	34	28,5	32,3	40,3	58,7
H5	12,7	24,9	25,5	21,3	16,2	12,5	9,79	7,25	6,27	5,27	6,07	7,66	12,9

A energia média mensal produzida por cada usina está na Tabela 7.49.

Tabela 7.49: Energia média gerada – Cenário 7

<i>Energia média gerada (MW) – Cenário 7</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
H1	7,34	10,1	10,5	10,4	9,72	8,57	7,11	5,08	4,42	3,73	4,28	5,75	7,25
H2	5,89	7,74	7,91	7,96	7,57	6,88	5,76	4,12	3,54	2,92	3,42	4,68	5,70
H3	3,53	6,86	7,71	6,54	4,94	3,45	2,62	1,78	1,51	1,23	1,46	2,10	3,64
H4	11,0	16,0	17,3	16,8	14,6	12,3	10,1	7,26	6,28	5,28	5,98	7,45	10,9
H5	1,82	3,59	3,67	3,07	2,33	1,80	1,41	1,04	0,90	0,76	0,87	1,10	1,86

As Tabelas 7.50 e 7.51 resumem, respectivamente, as concentrações médias de DBO e OD simuladas para os nós N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9, N10, N11 e N14.

Tabela 7.50: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 7

<i>Concentração de DBO (mg/l) – Cenário 7</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	16,1	0,56	0,52	0,60	0,71	0,87	1,11	1,51	1,81	1,99	1,58	1,31	2,39
N4	16,1	0,55	0,51	0,60	0,71	0,86	1,11	1,50	1,80	1,98	1,58	1,31	2,38
N5	16,1	0,55	0,51	0,59	0,71	0,86	1,10	1,49	1,79	1,98	1,57	1,30	2,38
N7	22,7	10,1	8,53	10,3	13,7	17,6	23,1	34,0	38,7	40,5	36,0	27,2	23,5
N8	17,8	7,11	5,56	7,07	9,96	13,4	18,1	27,5	31,7	33,1	29,3	21,6	18,5
N9	13,4	4,79	3,46	4,63	6,91	9,77	13,6	21,2	24,7	25,8	22,8	16,5	14,0
N10	4,35	1,61	1,13	1,57	2,34	3,29	4,62	7,04	8,49	8,97	7,50	5,90	4,73
N11	4,30	1,59	1,12	1,56	2,31	3,25	4,57	6,97	8,41	8,88	7,43	5,84	4,69
N14	28,5	15,5	13,2	16,0	20,3	24,6	30,4	40,7	46,7	50,4	44,5	38,3	30,8

Tabela 7.51: Concentrações médias mensais de OD, em mg/l – Cenário 7

<i>Concentração de OD (mg/l) – Cenário 7</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	6,20	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,30	6,30	6,30	6,30	6,31	6,30
N4	6,20	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,30	6,30	6,30	6,30	6,31	6,30
N5	6,20	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,30	6,30	6,30	6,30	6,31	6,30
N7	6,17	6,23	6,24	6,23	6,21	6,18	6,14	6,06	6,03	6,02	6,05	6,11	6,14
N8	6,20	6,27	6,29	6,27	6,24	6,21	6,17	6,09	6,06	6,05	6,08	6,14	6,17
N9	6,24	6,33	6,34	6,32	6,29	6,25	6,21	6,13	6,10	6,09	6,12	6,18	6,22
N10	6,30	6,34	6,34	6,34	6,32	6,30	6,29	6,26	6,24	6,24	6,25	6,27	6,29
N11	6,302	6,34	6,34	6,34	6,32	6,30	6,29	6,26	6,24	6,24	6,25	6,27	6,29
N14	5,86	6,07	6,11	6,06	5,99	5,92	5,82	5,67	5,58	5,52	5,61	5,70	5,83

7.9. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 8

Análogo ao Cenário 5, este último cenário foi simulado com as cinco PCHs em operação e considera que os municípios que não têm tratamento de esgoto implantem um sistema com uma eficiência de remoção da matéria orgânica de 80%. As Tabelas 7.52 e 7.53 mostram os resultados da simulação para os parâmetros DBO e OD.

Os nós N3, N4, e N5 apresentaram concentrações de 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 concentração desse parâmetro foi menor que 10 mg/l em 84,72%, 92,36%, 78,47%, 93,40% do tempo, respectivamente.

Tabela 7.52: Concentrações médias mensais de DBO, em mg/l – Cenário 8

<i>Concentração de DBO (mg/l) – Cenário 8</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	0,07	0,05	0,05	0,07	0,10	0,13	0,18	0,25	0,32	0,23	0,15	0,11	0,14
N4	0,06	0,05	0,05	0,07	0,10	0,13	0,17	0,25	0,32	0,30	0,15	0,11	0,14
N5	0,06	0,05	0,05	0,07	0,10	0,11	0,15	0,13	0,11	0,14	0,13	0,10	0,10
N7	2,39	1,72	1,81	2,61	3,87	5,07	7,41	10,8	12,8	10,2	6,78	4,56	5,84
N8	1,51	0,95	1,01	1,65	2,73	3,79	5,81	8,75	10,4	8,24	5,29	3,37	4,46
N9	0,90	0,50	0,54	0,99	1,81	2,69	4,34	6,74	8,16	6,34	3,95	2,38	3,28
N10	0,29	0,16	0,16	0,31	0,58	0,88	1,42	2,16	2,64	2,07	1,26	0,79	1,06
N11	0,28	0,16	0,16	0,31	0,58	0,87	1,40	2,14	2,61	2,05	1,25	0,78	1,05
N14	2,38	1,78	1,78	2,43	3,39	4,35	5,99	8,14	9,25	8,21	5,68	4,10	4,79

Tabela 7.53: Concentrações médias mensais de OD, em mg/l – Cenário 8

<i>Concentração de OD (mg/l) – Cenário 8</i>													
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Média</i>
N3	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,30	6,31	6,31	6,31	6,31
N4	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,30	6,31	6,31	6,31	6,31
N5	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31	6,05	6,05	4,47	3,68	4,73	5,78	6,04	5,70
N7	5,65	5,83	5,80	5,56	5,16	4,62	3,60	2,28	1,72	2,49	3,88	4,73	4,28
N8	6,27	6,28	6,28	6,26	6,24	6,21	6,17	6,11	6,07	6,12	6,18	6,22	6,20
N9	6,32	6,34	6,34	6,32	6,29	6,26	6,22	6,16	6,14	6,17	6,23	6,27	6,26
N10	6,39	6,41	6,40	6,38	6,35	6,32	6,28	6,23	6,21	6,24	6,29	6,34	6,32
N11	6,37	6,38	6,37	6,37	6,35	6,34	6,32	6,31	6,30	6,31	6,33	6,35	6,34
N14	6,37	6,38	6,37	6,37	6,35	6,34	6,32	6,31	6,30	6,31	6,33	6,35	6,34

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O Cenário 1 representa a situação atual das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí. As demandas de água para irrigação e abastecimento urbano e industrial têm um grau de atendimento de 100% em todo o período de simulação (1980 a 2003). Entretanto a água está se esgotando qualitativamente e medidas de controle e prevenção da poluição dos recursos hídricos devem ser tomadas.

Os índices de satisfação da geração de energia nas PCHs de Dourados e São Joaquim foram de 82,48 % e 86,26 % e cada usina gerou em média, respectivamente, 8,91 MW e 6,94 MW.

Deve-se ressaltar uma consideração de extrema importância. Neste trabalho, foram analisados apenas os parâmetros OD e DBO e, para verificar o grau de poluição deles na água, compararam-se os valores de suas concentrações com os valores limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986, na qual se encontra a classificação das águas e seus níveis de qualidade avaliados por indicadores específicos, de modo a assegurar os usos preponderantes. São especificados em cada classificação valores limites de diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos indicando que a partir da análise de apenas dois parâmetros, nenhuma classificação pode ser garantida. O enquadramento dos trechos do rio Sapucaí-Mirim em Classe 2 ou 3 baseou-se apenas em uma comparação das concentrações de OD e DBO com os valores limites indicados para cada classe e não deve ser levado como uma definição de classes de água doce, uma vez que outras variáveis não foram analisadas.

A simulação mostrou que a concentração de DBO manteve-se abaixo de 5 mg/l nos nós N3, N4 e N5 e a concentração de OD esteve acima de 5 mg/l para os mesmos nós, condição favorável para a classificação deste trecho do rio como pertencente à Classe 2.

O rio Sapucaí-Mirim deteriora-se qualitativamente a partir do nó N6 no qual são lançados esgotos domésticos “in natura” de Batatais e Patrocínio Paulista resultando, em N8,

uma concentração média de DBO e OD de, respectivamente, 9,98 mg/l e 6,24 mg/l. As concentrações de DBO estiveram acima de 10 mg/l no período de julho a novembro.

São José da Bela Vista capta água para abastecimento urbano nas proximidades de N8. Esta água é, portanto, matéria-prima para a estação de tratamento de água, cuja tecnologia e processos envolvidos dependem exclusivamente da qualidade da água bruta. Por exemplo, para estarem adequadas ao consumo, as águas de classe especial necessitam apenas de uma simples desinfecção. No tratamento das águas de Classe 1 deve ser feita filtração direta, desinfecção, porém é um tratamento mais simples e barato que o das Classes 2 ou 3.

O reservatório de São Joaquim auxilia na melhora da qualidade da água. Após percorrer um trecho com suas águas enquadradas na Classe 3, após este reservatório, o rio Sapucaí-Mirim pode novamente receber a classificação Classe 2. As concentrações médias simuladas de DBO e OD foram, respectivamente, 2,81 mg/l e 6,3 mg/l. Em apenas 17,01% dos meses simulados a concentração de DBO esteve acima de 5 mg/l.

Após sutil melhora na qualidade da água, o rio Sapucaí-Mirim recebe o esgoto doméstico sem tratamento de São Joaquim da Barra e Guará e encontra o rio Grande com uma concentração de DBO superior a 10 mg/l.

No Cenário 2 considerou-se que as pequenas centrais hidrelétricas de Dourados e São Joaquim devam gerar suas respectivas energias asseguradas, de forma a forçar os reservatórios a liberar uma maior vazão de água nos nós a sua jusante.

A satisfação da demanda para os diversos usos da água foi de 100% em todo o período de simulação.

A PCH Dourados produziu, em 91,44% do tempo, a capacidade assegurada, gerando em média, 7,11 MW. Já a PCH São Joaquim gerou, com 94% de satisfação, sua capacidade assegurada. A energia média produzida pela usina foi de 5,3 MW.

Em comparação com o Cenário 1, ocorreram poucas mudanças nos resultados obtidos para o nó N8. A concentração média de DBO diminuiu para 9,8 mg/l, enquanto que a de OD manteve-se praticamente constante. A concentração de DBO esteve abaixo de 5 mg/l em 34,38% do tempo de simulação contra 31,6% do tempo no Cenário 1.

Poucas mudanças ocorreram também no nó N9 quando se compara o Cenário 1 com o Cenário 2. Neste último, a concentração média de DBO foi de 2,65 mg/l e de OD foi de 6,31 mg/l. A concentração de DBO manteve-se inferior a 5 mg/l em 82,64% do período simulado no Cenário 2 e em 82,99% do tempo no Cenário 1.

As concentrações das variáveis de qualidade da água são mantidas praticamente as mesmas na confluência do rio Sapucaí-Mirim com o rio Grande.

Pelo exposto, comparando-se os dois primeiros cenários, não se justifica a redução na produção de energia, uma vez que não houve melhora significativa na qualidade da água. Observando a geração média de cada PCH, a redução na produção de energia no Cenário 2 foi de 20,2% para H1 e 23,6% para H2. No total, o Cenário 1 produz 15,85 MW enquanto que no Cenário 2 são gerados 12,41 MW.

O Cenário 3 mostra outra realidade das sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí, quando é considerada a demanda para irrigação estimada pelo Plano Estadual dos Recursos Hídricos. Neste caso, a disponibilidade hídrica é menor que a demanda, uma vez que há falhas no atendimento da irrigação de Patrocínio Paulista (satisfação de 97,8%) e comprometimento do abastecimento industrial de Batatais e Patrocínio Paulista (satisfação de 87,4%). As demais captações superficiais de água continuam com 100% de satisfação durante os anos de 1980 a 2003.

Em decorrência do aumento da demanda para irrigação e conseqüente diminuição da disponibilidade hídrica, os índices de satisfação da geração de energia das PCHs Dourados e São Joaquim são, respectivamente, 6,08% e 7,98% menores que os do Cenário 1. Houve também uma piora significativa na qualidade da água.

Percebe-se, portanto, que o fato de não se ter um dado realístico da demanda de água para irrigação interfere no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Através de visita feita na Casa da Agricultura de Franca, constatou-se a não existência de dados reais de irrigação e culturas plantadas por área. O Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande possui apenas dados de outorga que muitas vezes não condiz com a realidade; primeiro porque, devido à falta de controle, muitos irrigantes gastam mais água do que prescrito na outorga; e segundo, porque muitos irrigantes não têm outorga pelo direito do uso da água. Esta situação repete-se em muitas regiões do Estado de São Paulo e percebe-se a importância e necessidade de ações que visem estimar e controlar a demanda de água para irrigação.

O Cenário 4 representa o planejamento do sistema de recursos hídricos numa situação crítica causada pela ocorrência de vazões mínimas mensais. Todas as demandas cadastradas para uso da água na irrigação e abastecimento urbano e industrial foram 100% atendidas em todo o período de simulação, o que evidencia que, em termos quantitativos, a oferta está suprimindo a demanda de água.

O grau de atendimento do esquema H1 foi de 67,2% e a geração média foi de 7,25 MW, 18,6% menor que no Cenário 1. A satisfação de H2 foi de 70,3% e 5,66 MW foram gerados em média (18,4% a menos que no Cenário 1).

Conseqüentemente, os resultados obtidos para a DBO foram piores que os do Cenário 1. A concentração de OD permaneceu acima de 5 mg/l em todos os nós.

As concentrações médias de DBO nos nós N3, N4 e N5 foram, respectivamente, 1,56 mg/l, 1,55 mg/l e 1,55 mg/l. Até o nó N6, estas concentrações estão dentro dos limites estabelecidos para a Classe 2. A partir deste nó até N9 as concentrações se encaixam melhor para a Classe 3 e no trecho N9-N10 a concentração média de DBO é de 4,58 mg/l, permanecendo abaixo de 5 mg/l em 62,15% do tempo. Em N10, o rio Sapucaí-Mirim recebe os efluentes domésticos sem tratamento de São Joaquim da Barra e Guará, desaguardo no rio Grande com uma alta concentração de DBO.

No Cenário 5 considerou-se que as cidades que não possuem tratamento de esgoto (Santo Antônio da Alegria, Patrocínio Paulista, Batatais, São Joaquim da Barra e Guará) implantem sistemas de tratamento com uma eficiência de remoção da matéria orgânica de 80%. Estes sistemas podem ser lagoas de estabilização, lagoas facultativas e lagoas em geral.

Durante os anos de 1980 a 2003 todos os nós apresentaram concentrações de OD superiores a 5 mg/l.

Em 100% do período de simulação, as concentrações de DBO dos nós N3, N4 e N5 foram adequadas para a Classe 1 (até 1 mg/l). As mesmas, nos nós N7 e N8 foram menores que 5 mg/l em, respectivamente, 56,03% e 78,82% do tempo e manteve-se abaixo deste valor em todo o período de simulação em N9.

A conformidade com os padrões para Classe 2 é encontrada no trecho de N6 até N10, onde são lançados os resíduos de São Joaquim da Barra e Guará, a partir do qual a DBO apresenta-se menor que 5 mg/l e 10 mg/l em, respectivamente, 65,97% e 97,92% do tempo (nó N12).

Estes resultados ressaltam a importância e necessidade do tratamento de esgoto na região.

O Cenário 6 foi simulado com as cinco PCHs em operação. O grau de atendimento dos esquemas H1, A2, A3, A5 e A6 foi de 100% em todo o período de simulação. A satisfação do esquema H1 foi de 79,94%, gerando em média, 8,63 MW. H2, com uma satisfação de 83,4%, gerou em média 6,71 MW.

A produção de energia da PCH Palmeiras foi atendida em 39,5% do período simulado. A geração média foi de 5,38 MW e, em 30,9% do tempo, o esquema H3 gerou mais que 6,91 MW. Já a geração de energia da PCH Anhangüera foi atendida em 72,4% do tempo, gerando em média 13,4 MW. Em 72,92% do tempo simulado, o esquema H4 gerou acima da energia assegurada (8,91 MW). A satisfação na produção de energia da PCH Retiro foi de 18,5% e a geração média foi de 2,66 MW.

As cinco usinas geraram em média 36,78 MW, aproximadamente 20 MW a mais do que com as duas PCHs em operação. Com relação à qualidade da água, não houve mudanças significativas.

O Cenário 7 reflete uma situação de vazões mínimas mensais e as 5 PCHs em operação. Apenas o abastecimento industrial do esquema A2 foi comprometido, cujo grau de atendimento foi de 99,7%. Os esquemas H1, H2, H3, H4 e H5 geraram as suas capacidades asseguradas em, respectivamente, 49,65%, 56,6%, 14,24%, 52,78% e 1,74% do tempo de simulação. A energia total produzida foi de 29,35 MW.

O último cenário demonstrou a significativa melhora da qualidade da água decorrente da implantação de estações de tratamento de esgoto. Os nós N3, N4, e N5 apresentaram concentrações de DBO abaixo de 1 mg/l em todo o período de simulação, limite para se enquadrar este trecho na Classe I.

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 concentração desse parâmetro foi menor que 10 mg/l em 84,72%, 92,36%, 78,47%, 93,40% do tempo, respectivamente.

Em suma, neste trabalho foi demonstrado que a quantidade de água disponível nas sub-bacias do Alto, Médio e Baixo Sapucaí é suficiente para atender a demanda para uso doméstico e industrial (a geração de energia é prejudicada em todos os cenários), porém deve-se ter cuidado com a vazão de água superficial captada para irrigação. A não confiabilidade nos dados existentes interfere o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Uma sugestão para futuros trabalhos seria fazer coleta de campo e visitas a produtores rurais, proporcionando resultados mais significativos, incluindo estudos da bacia, estudo de irrigação, uso do solo, demandas atuais de irrigação, tipos e características das culturas e períodos de irrigação. O próprio comitê de bacia deveria ter projetos para este tipo de levantamento de dados.

Na região em estudo, a água está se tornando escassa qualitativamente. A única maneira de se controlar a poluição é através da implantação de sistemas de tratamento de esgoto.

Outra sugestão para trabalhos posteriores seria analisar outros parâmetros de qualidade da água, como o cromo, que é freqüentemente encontrado devido aos rejeitos dos curtumes, e fazer medidas no campo para poder calibrar os parâmetros do modelo com os dados observados. Além disto pode ser feito o planejamento de cenários futuros, através de avaliação do crescimento populacional e desenvolvimento econômico.

O modelo MIKE BASIN mostrou-se ser extremamente versátil e de fácil uso, uma ótima ferramenta para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Apesar das simplificações necessárias, decorrentes entre outros motivos à falta de dados, o modelo permitiu

uma boa representação do sistema em estudo. As características do modelo que mais se destacam são a facilidade de representação dos sistemas hídricos e manipulação dos dados e o rápido tempo de processamento das simulações.

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

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAYA, A. B.; SOUISSI, 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.
- ALI, M. D. H.; SHUI, L. T. (2001). *Optimal Allocation of Monthly Water Withdrawals in Reservoir Systems*. Water Resources Management, v. 15, n. 5, p. 323-341, October.
- AMMENTORP. (1999). *Application of Mike Basin to the Nakanbé Catchment*. Paper presented at the 4th DHI Software Conference. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/Publications/index.htm>. (Acessado em 08/09/2003).
- ANDERSEN, J.; REFSGAARD, J. C.; JENSEN, K. H. (2001). *Distributed Hydrological Modelling of the Senegal River Basin – Model Construction and Validation*. Journal of Hydrology, v. 247, n. 3-4, p. 200-214, 2 July.
- ANDREU, J.; CAPILLA, J.; SANCHÍS, E. (1996). *AQUATOOL, a Generalized Decision-Support System for Water-Resources Planning na Operational Management*. Journal of Hydrology, v. 177, n. 3-4, p. 269-291.
- AZAMBUJA, C. (2000). *Disponibilidade Hídrica na Bacia do Rio Piracicaba*. São Carlos. 200p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 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.
- AZEVEDO, L. G. T.; GATES, T. K.; FONTANE, D. G.; LABADIE, J. W.; PORTO, R. L. (2000). *Integration of Water Quantify and Qaulity in Strategic River Basin Planning*. Water Resources Planning and Management, v. 126, n. 2, p. 85-97.

- BALDOCHI, M. A. (2002). *Utilização do Modelo QUAL2E como Apoio ao Gerenciamento da Qualidade das Água da Bacia do Córrego dos Bagres*. São Carlos. 168p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BECKER, L.; YEH, W. W-G. (1974). *Optimization of Real Time Operation of a Multiple-Reservoir System*. Water Resources Research, v. 10, n. 6, p. 1107-1112, December.
- BELAINEH, G.; PERALTA, R. C.; HUGHES, T. C. (1999). *Simulation/Optimization Modeling for Water Resources Management*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 125, n. 3, p. 154-161, May/June.
- 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.
- BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F. (2001). *Multiobjective Real-Time Reservoir Operation with a Network Flow Algorithm*. Journal of the American Water Resources Association, v. 37, n. 4, p. 837-852, August.
- BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R. (2000). *Hydrological Simulation of the International Catchment of Guadiana River*. Physics and Chemistry of the Earth – Part B, v. 25, n. 3, p. 329-339, January.
- BRAS, R. L.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I. (1985). *Random Functions and Hydrology*. Reading Mass. Addison-Wesley. 559p.
- CAI, X.; MCKINNEY, D. C.; LASDON, L. S. (2003). *Integrated Hydrologic-Agronomic-Economic Model for River Basin Management*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 129, n. 1, p. 4-17, January/February.
- CAMPBELL, S. G.; HANNA, R. B.; FLUG, M.; SCOTT, J. F. (2001). *Modeling Klamath River System Operations for Quantity and Quality*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 127, n. 5, p. 284-294, September/October.
- CAMPBELL, J. E.; BRIGGS, D. A.; DENTON, R. A.; GARTRELL, G. (2002). *Water Quality Operation with a Blending Reservoir an Variable Sources*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 128, n. 4, p. 288-302, July/August.

- COLON, R.; MCMAHON, G. F. (1987). *BRASS Model: Application to Savannah River System Reservoirs*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 113, n. 2, p. 177-190, March.
- DAI, T.; LABADIE, J. W. (2001). *River Basin Network Model for Integrated Water Quantity/Quality Management*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 127, n. 5, p. 295-305, September/October.
- DANDY, G. C.; CONNARTY, M. C.; LOUCKS, D. P. (1997). *Comparison of Methods for Yield Assessment of Multiple Reservoir Systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 123, n. 6, p. 350-358, November/December.
- DEMUYNCK, C.; BAUWENS, W.; DE PAWU, N.; DOBBELAERE, I.; POELMAN, E. (1997). *Evaluation of Pollution Reduction Scenarios in a River Basin: Application of Long Term Water Quality Simulations*. Water Science and Technology, v. 35, n. 9, p. 65-75.
- 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).
- EISELE, M.; KIESE, R.; KRÄMER, A.; LEIBUNDGUT, C. (2001). *Application of a Catchment Water Quality Model for Assessment and Prediction of Nitrogen Budgets*. Physics and Chemistry of the Earth – Part B, v. 26, n. 7, p. 547-551, September.
- ESCHENBACH, E. A.; MAGEE, T.; ZAGONA, E.; GORANFLO, M.; SHANE, R. (2001). *Goal Programming Decision Support System for Multiobjective Operation of Reservoir Systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 127, n. 2, p. 108-120, March/April.
- FREVERT, D. K.; LABADIE, J. W.; LARSON, R. K.; PARKER, N. L. (1994). *Integration of Water Rights and Network Flow Modeling in the Upper Snake River Basin*. Proceedings of 21st Annual Conference, Water Resources Planning and Management Div., D. G. Fontane and H. N. Tüvel, eds., ASCE, Denver, Colorado.
- FROUCK, M. L. (2001). *Decision-Support System for Domestic Water Demand Forecasting and Management*. Water Resources Management, v. 15, n. 6, p. 363-382, December.

- GRAHAM, L. P.; LABADIE, J. W.; HUTCHISON, I. P. G.; FERGUSON, K. A. (1986). *Allocation of Augmented Water Supply under a Priority Water Rights System*. Water Resources Research, v. 22, n. 7, p. 1083-1094.
- Guide to Getting Started Tutorial (2003). <http://dhi.dk/gishydro/mikebas/Mbasbody.htm> (acessado em 10/05/2002)
- HALL, W. A.; BUTCHER, W. S.; ESOGBUE, A. (1968). *Optimization of the Operation of a Multiple-Purpose Reservoir by Dynamic Programming*. Water Resources Research, v. 4, n. 3, p. 471-477, June.
- HSU, N-S.; CHENG, K-W. (2002). *Network Flow Optimization Model for Basin-Scale Water Supply Planning*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 128, n. 2, p. 102-112, March/April.
- HWANG, C. L.; WILLIAMS, J. L.; SHOJALASHKARI, R.; FAN, L. T. (1973). *Regional Water Quality Management by the Generalized Reduced Gradient Method*. Water Resources Bulletin, v. 9, p. 1159-1180.
- JAIRAJ, P. G.; VEDULA, S. (2000). *Multireservoir System Optimization Using Fuzzy Mathematical Programming*. Water Resources Management, v. 14, n. 6, p. 457-472, December.
- JENSEN, R. A.; STORM, B.; LASARTE, A. E. (2000). *Integrated River Basin Management Modeling, Water Use and Water Quality Simulation*. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/Publications/index.htm>. (Acessado em 08/09/2003).
- JOLMA, A.; DE MARCHI, C.; SMITH, M.; PERERA, B. J. C.; SOMLYÓDY, L. (1997). *StreamPlan: a Support System for Water Quality Management on a River Basin Scale*. Environmental Modelling & Software, v. 12, n. 4, p. 275-284.
- 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.
- KJELDSSEN, 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.
- KOUTSOYIANNIS, D.; EFSTRATIADIS, A.; KARAVOKIROS, G. (2002). *A Decision Support Tool for the Management of Multi-Reservoir Systems*. Journal of the American Water Resources Association, v. 38, n. 4, p. 945-958, August.

- LABADIE, J. W.; PINEDA, A. M.; BODE, D. A. (1984). *Network analysis of raw supplies under complex water rights and exchanges: Documentation for program MODSIM3*. Colorado Water resources Institute, Fort Collins, Colorado.
- LABADIE, J. W.; BODE, D. A.; PINEDA, A. M. (1986). *Network Model for Decision Support in Municipal Raw Water Supply*. Water Resources Bulletin, v. 22, n. 6, p. 927-940, December.
- LABADIE J. W.; BRAZIL, L. E.; CORBU, I.; JONSON, L. E., (1989). *Computerized decision support systems for water managements*. ASCE, New York.
- LARSEN, H.; MARK, O.; JHA, M. K.; DAS GUPTA, A. (2000). *The Application of Models in Integrated River Basin Management*. International publication, Asian Institute of Technology and DHI Water & Environment. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/Publications/index.htm>. (Acessado em 08/09/2003).
- LAW, J.; BROWN, M. (1989). *Development of a Large Network Model to Evaluate Yield of a Proposed Reservoir*. Computerized Decision Support Systems for Water Managers, J. Labadie, et al., eds., ASCE, New York, p. 621-631.
- 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.
- MACDONALD, A. (1998). *Modelling for Integrated Water Resources and Environmental Management*. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/Publications/index.htm>. (Acessado em 08/09/2003).
- MATALAS, N. C. (1967). *Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology*. Water Resources Research, v. 3, n. 4, p. 937-945.
- MAUAD, F. F. (2000). *Planejamento Integrado de Recursos Hidroenergéticos: O Confronto de Usos Múltiplos da Água no Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva em Portugal*. Campinas. 182 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

- MERABTENE, T.; KAWAMURA, A.; JINNO, K.; OLSSON, J. (2002). *Risk Assessment for Optimal Drought Management for an Integrated Water Resources System Using a Genetic Algorithm*. Hydrological Processes, v. 16, n. 11, p. 2189-2208, August.
- NEELAKANTAN, T. R.; PUNDARIKANTHAN, N. V. (1999). *Hedging Rule Optimisation for Water Supply Reservoirs System*. Water Resources Management, v. 13, n. 6, p. 409-426, December.
- NING, S. K.; CHANG, N.-B.; YANG, L.; CHEN, H. W.; HSU, H. Y. (2001). *Assessing Pollution Prevention Program by QUAL 2E Simulation Analysis for the Kao-Ping River Basin, Taiwan*. Journal of Environmental Management, v. 61, n. 1, p. 61-76. Jan.
- NISHIKAWA, T. (1998). *Water-Resources Optimization Model for Santa Barbara, California*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 124, n. 5, p. 252-263, September/October.
- 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.
- PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS: primeiro plano do Estado de São Paulo, DAEE, 1990.
- RAO, Z.; MOORE, I. N.; O'CONNELL, P. E.; JAMIESON, D. G. (2001). *An Interactive Management System for Operational Control of Kirazdere Reservoir (Turkey)*. Water Resources Management, v. 15, n. 4, p. 223-234, August.
- Relatório Final do Projeto Básico: Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Sapucaí. (2001). v. 1 e 2. Desenvolvido pela Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL e ENGEVIX Engenharia S/C LTDA.
- Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo (2001). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB
- Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000). Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Sapucaí-Mirim/Grande

- 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.
- SAHU, M. K.; GUPTA, A. (2001). *Reservoir Operation and Evaluation of Downstream Flow Augmentation*. Journal of the American Water Resources Association, v. 37, n. 3, p. 675-684, June.
- SALAS, J. D.; DELLEUR, J. W.; YEVJEVICH, V.; LANE, W. L. (1980). *Applied Modelling of Hydrologic Times Series*. Littleton, Water Resources Publications.
- SASIKUMAR, K.; MUJUMDAR, P. P. (1998). *Fuzzy Optimization Model for Water Quality Management of a River System*. Journal of Water resources Planning and Management, v. 124, n. 2, p. 79-88, March/April.
- SHIM, K. C.; FONTANE, D. G.; LABADIE, J. W. (2002). *Spatial Decision Support System for Integrated River Basin Flood Control*. Journal of Water resources Planning and Management, v. 128, n. 3, p. 190-201, May/June.
- SINHA, A. K.; RAO, B. V.; LALL, U. (1999). *Yield Model for Screening Multipurpose Reservoir Systems*. Journal of Water resources Planning and Management, v. 125, n. 6, p. 325-332, Nov./Dec.
- SOMLYÓDY, L. (1997). *Use of Optimization Models in River Basin Water Quality Planning*. Water Science and Technology, v. 36, n.5, p. 209-218.
- SPRAGUE, R. H.; CARLSON, E. D., (1982). *Building Effective Decision Support Systems*. Englewood Cliffs, N. J. – Prentice – Hall.
- SPANOU, M.; CHEN, D. (2000). *An Object-oriented Tool for the Control of Point-Source Pollution in River Systems*. Environmental Modelling & Software, v. 15, n. 1, p. 35-54.
- 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.
- TATE, E. L.; FARQUHARSON, F. A. K. (2000). *Simulating Reservoir Management Under the Threat of Sedimentation: The Case of Tarbela Dam on the River Indus*. Water Resources Management, v. 14, n. 3, p. 191-208, June.

- 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.
- VOTRUBA, L. et al. (1998). *Developments in Water Science*. Analysis of Water Resource Systems. Nova York. Elsevier Science Publishing Company, Inc.
- 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.
- YEH, W. W-G. (1985). *Reservoir Management and Operations Models: a State-of-the-Art Review*. Water Resources Research, v. 21, n. 12, p. 1797-1818, December.
- 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.
- YEVJEVICH, V. M. (1971). *Systems Approach to Hydrology. Proceedings of the first bilateral us. Japan seminar in hydrology*. Eastwest Center of University of Hawaii, Honolulu. January 11-17. Fort Collins: Water Resources Publications, 1971.

10. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- ALBERTIN, L. L.; PEIXOTO, L. S.; MAUAD, F. F. (2002). Potencial da Energia Maremotriz no Brasil. VIII SIMPÓSIO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL. São Carlos, SP.
- MAUAD, F. F.; ALBERTIN, L. L.; CORRÊA FILHO, C. R. R.; BARBOSA, A. R. A.; OLIVEIRA, H. R. (2003). Avaliação de Conflitos de Usos Múltiplos de Água em Sistemas de Recursos Hídricos: O Estado da Arte. XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. ABRH. Curitiba, PR.
- MAUAD, F. F.; ALBERTIN, L. L. (2003). Gerenciamento Integrado de Quantidade e Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí-Mirim/Grande: Aplicação de Simulação Computacional. XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. ABRH. Curitiba, PR.
- ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. (2003). Aplicação de Simulação Computacional para Gerenciamento de Quantidade e Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí-Mirim/Grande. IX SIMPÓSIO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL. São Carlos, SP.
- ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. (2003). Aplicação de Simulação Computacional para Gerenciamento de Quantidade e Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí-Mirim/Grande. Capítulo de livro do IX SIMPÓSIO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL. São Carlos, SP.