



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOUTORADO TEMÁTICO
DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS



TESE DE DOUTORADO

PAULO ROMERO GUIMARÃES SERRANO DE ANDRADE

**ESTUDO PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DAS ÁGUAS DE
UM SISTEMA DE RESERVATÓRIOS EM SÉRIE E EM
PARALELO, PARA USOS E OBJETIVOS MÚLTIPLOS,
NA BACIA DO RIO CAPIBARIBE, PE.**

CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba – Brasil
Setembro - 2006

PAULO ROMERO GUIMARÃES SERRANO DE ANDRADE

**ESTUDO PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DAS ÁGUAS DE UM SISTEMA DE
RESERVATÓRIOS EM SÉRIE E EM PARALELO, PARA USOS E OBJETIVOS
MÚLTIPLOS, NA BACIA DO RIO CAPIBARIBE, PE.**

**Tese submetida ao Programa de Doutorado em
Recursos Naturais da Universidade Federal de
Campina Grande, como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor em Recursos
Naturais.**

**Área de Concentração: Recursos Hídricos.
Linha de Pesquisa: Planejamento e
Gerenciamento de
Recursos Hídricos.**

**ORIENTADOR PRINCIPAL: PROF. DR. WILSON FADLO CURI
SEGUNDO ORIENTADOR: PROF. DRA. ROSIRES CATÃO CURI**

**CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba – Brasil
Setembro - 2006**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A553e Andrade, Paulo Romero Guimarães Serrano de
2006 Estudo para alocação ótima das águas de um sistema de reservatórios em série e em paralelo, para usos e objetivos múltiplos, na bacia do Rio Capibaribe/ Paulo Romero Guimarães Serrano de Andrade . – Campina Grande, 2006.
p.: 227: il.

Referências.

Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Wilson Fadlo Curi e Rosires Catão Curi.

1- Recursos Hídricos - Planejamento 2- Recursos Hídricos – Gerenciamento de Sistemas 3 – Recursos Hídricos – Indicadores de Desempenho I- Título

CDU – 556.18

SISTEMOTECA - UFCG

DIGITALIZAÇÃO:

PAULO ROMERO GUIMARÃES SERRANO ANDRADE

**ESTUDO PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DAS ÁGUAS DE UM SISTEMA DE
RESERVATÓRIOS EM SÉRIE E EM PARALELO PARA USOS E OBJETIVOS
MÚLTIPLOS NA BACIA DO RIO CAPIBARIBE, PE**

APROVADO EM: 13/09/2006

BANCA EXAMINADORA:



WILSON FADLO CURI

Unidade Acadêmica de Física - UAF
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



ROSIRES CARÃO CURI

Unidade Acadêmica de Engenharia Civil - UAEC
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



ABELARDO ANTÔNIO DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO

Departamento de Tecnologia Rural - DTR
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE



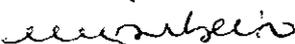
JAIME JOAQUIM DA SILVA PEREIRA CABRAL

Departamento de Engenharia Civil - DEC
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE



JOSÉ DANTAS NETO

Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola – UAEAg
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



MÁRCIA MARIA RIOS RIBEIRO

Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UAEC
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

“ [...] Os meios preferíveis para evitar as cheias do Capibaribe devem ser aqueles que servirem ao mesmo tempo para atenuar o flagelo das secas.”

Engenheiro Raphael Arcanjo Galvão Filho (*)

(*) Citação do Relatório *Estudos Sobre os Melhoramentos do Porto de Pernambuco; Causas das Cheias dos Rios que Deságuam no mesmo Porto e Meios de Removê-las, de 31 de outubro de 1870*, elaborado para o então Ministério da Agricultura, Comércio e Obras Públicas. (apud Barragem do Carpina - Relatório da 1ª Etapa. CISAGRO / PE. p.4.1. 1990)

DEDICAÇÃO

**Aos meus pais Nivardo Serrano de
Andrade (in memorian) e Lygia
Guimarães Serrano de Andrade,
exemplos de vida, espíritos
iluminados.**

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À minha mulher Marizeth, pelo apoio incondicional, gestos de amor e de incentivo concedidos ao longo dos anos de elaboração deste trabalho.

Aos meus queridos filhos, Rodrigo, Rafaela, Romero e Gustavo, aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos, pelo carinho e torcida pelo sucesso do trabalho, compreendendo as horas roubadas da nossa convivência.

Ao Professor Doutor Wilson Fadlo Curi e à Professora Doutora Rosires Catão Curi, queridos Mestres, pela sábia orientação na condução desta pesquisa, pela amizade e fidalguia no trato pessoal e profissional.

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq / CT-Hidro, pelo apoio recebido em forma de concessão de bolsa, durante grande parte do curso.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, pela concessão de auxílio de subsistência mensal, quando da fase inicial do curso.

À Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária - IPA, pela concessão da oportunidade, incentivo e confiança depositados ao longo de grande parte do curso.

À Diretoria de Operações da Empresa Baiana de Águas e Saneamento – EMBASA, pelo apoio concedido à conclusão e defesa desta pesquisa.

À Coordenação e Secretaria do Curso de Doutorado em Recursos Naturais da UFCG, nas pessoas do Professor Doutor Pedro Vieira e Sra. Cleide, respectivamente, pelo suporte oferecido no encaminhamento de questões administrativas do meu curso.

Ao Departamento de Física da UFCG, nas pessoas dos Coordenadores Professor Doutor Vijay Pal Singh Nain (no início do Curso de Doutorado) e Professor Doutor João Evangelista Franco do Carmo (na parte final do Curso de Doutorado), demais professores e colaboradores, pela feliz oportunidade da convivência.

À Coordenação da Área de Recursos Hídricos da UFCG, na pessoa da Profa. Dra. Márcia Rios Ribeiro, demais professores, funcionários e colegas, pela contribuição que emprestaram, da forma mais diversificada, em ajuda à elaboração deste trabalho.

Aos Professores José Dantas, Marx Barbosa e Mário de Miranda, e colegas da turma do ano de 2001, do Curso de Doutorado em Recursos Naturais da UFCG, pelos ensinamentos, companheirismo e amizade.

A todos aqueles que, encarnados ou desencarnados, contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente ao povo brasileiro que possibilitou os meus estudos e formação no Curso de Doutorado em Recursos Naturais.

RESUMO

No Nordeste brasileiro, nos últimos anos, técnicas modernas de gestão de recursos hídricos vêm sendo difundidas e aplicadas à alocação de recursos hídricos, que são escassos e competitivos. O uso dessas técnicas no dimensionamento e operação da infra-estrutura hídrica regional existente, entretanto, é ainda modesto, embora se saiba que sua aplicação pode permitir o aumento da eficiência econômica dos investimentos e favorecer para que a alocação das águas acumuladas em represas ocorra de maneira mais eficaz. Este trabalho busca contribuir para diminuir a lacuna ainda existente entre os desenvolvimentos teóricos e a prática da análise e operação de sistemas de reservatórios, pela exploração de uma abordagem que combina as técnicas de otimização e simulação.

Utilizou-se como estudo de caso a operação integrada de um sistema hídrico formado por cinco reservatórios e perímetros de irrigação, localizado na bacia do rio Capibaribe, no Estado de Pernambuco. Esta bacia conota grande importância sócio-econômica pelas funções que exerce como produtora de alimentos - pesca extrativa e cultivo, recepção de despejos e, principalmente, como grande provedora de água para consumo humano e animal, uso industrial e agrícola. No estudo de otimização da operação do sistema hídrico, utilizou-se modelo com base em programação não-linear que busca a maximização da receita líquida anual advinda da agricultura irrigada, avaliando-se ainda o retorno financeiro da piscicultura extensiva nos reservatórios, em variados cenários.

Na simulação da operação integrada dos reservatórios e perímetros de irrigação, empregou-se modelo baseado em rede de fluxo, aproveitando estratégias operacionais resultantes da otimização, sendo estabelecidos cenários prospectivos baseados na variação de prioridades para atendimento das demandas do uso múltiplo da água. Na análise de alternativas geradas pela simulação, foram utilizados os conceitos de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, que permitiram comparar diferentes cenários.

A importância do estudo de otimização evidenciou-se pela determinação da vazão mensal ótima a ser liberada de cada reservatório para atender às diferentes demandas da irrigação, e permitiu definir que reservatório Carpina, originalmente projetado para controle de cheias do rio Capibaribe, pode regularizar significativa vazão para reforço do abastecimento de água da cidade de Recife. Entre outros, os resultados da otimização indicaram que as áreas máximas cogitadas para os perímetros não são, totalmente, factíveis de serem beneficiadas com irrigação. Entretanto, foi possível atestar que a prática da agricultura irrigada pode ser sustentada pelos reservatórios, sendo capaz de promover significativas melhorias na condição sócio-econômica da região, contribuindo para a geração de emprego e renda.

A aplicação do critério de sustentabilidade às demandas de irrigação, associado à receita líquida potencial anual da produção agrícola irrigada, hierarquizando os indicadores de desempenho, pode subsidiar políticas de preferências na operação do sistema hídrico, visto que a agricultura irrigada está sujeita a riscos e incertezas hidrometeorológicas. A pesquisa revelou que, mesmo idealizando-se abordagens determinísticas onde se imaginou o futuro como conhecido através de cenários de planejamento, o esquema metodológico adotado mostrou-se adequado e os resultados alcançados são interessantes subsídios para o processo decisório para melhoria da eficiência do uso da água de reservatórios de múltiplos usos, mormente em regiões submetidas a freqüentes problemas de escassez hídrica, como é o caso da bacia do rio Capibaribe.

PALAVRAS-CHAVE: Planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos; modelagem integrada; indicadores de desempenho.

ABSTRACT

Over the last few years, modern techniques of water resources management have been applied to problems of allocating scarce water resources among competitive water users at the northeast region of Brazil. They are applied at planning and operation of existing regional water infrastructures. Although their applications improve financial investments' efficiency and reservoir water allocation efficacy, their use is still considered modest. This work is concerned with reducing the gap between theoretical developments and practical analysis of reservoir operation systems through the use of combined simulation and optimization techniques.

The operation of an integrated system of five reservoirs and an irrigated perimeter, located at the Capibaribe River basin in the Pernambuco State, were used as a case to study. This river basin is of great socioeconomic importance to the region due its function in food production – fishing and agriculture -, reception and dilution of served waters, industrial uses and drinking water supply for human and animal uses.

An optimization model, based on nonlinear programming, was used to maximize the net profit of the agricultural and extensive fishing system's management for several scenarios.

Taking into account the operation strategy, which was obtained from the system optimization, the simulation model, based on a network flow model to allocate water according to priority scenarios for fulfillment of multi use demand requirements, was carried out. Concepts of reliability, resilience and vulnerability were used to compare different scenarios.

At the optimization study, in which a monthly flow release for each reservoir was established to meet irrigation demands, was noticed that the Carpina reservoir, exclusively projected to flood protection, may regulate a significant water flow to reinforce the Recife urban water demand supply. Moreover, the optimization results have shown that it is possible to practice irrigated agriculture, supported by the reservoirs, in order to promote significant socioeconomic improvements at the region through generation of jobs and incomes. Only part of the available land for agriculture can be used for irrigation.

The sustainability criterion, when applied to meeting irrigation water demand associated with its net profit and hierarchy performance indexes, can provide support to establish operation preference policies, once the agriculture is prone of risks due hydro-meteorological uncertainties. Although deterministic approach, where the future is known through planning scenarios, was used, this research revealed that the used methodological approach provided interesting decision support results to improve the operation of operations and the efficiency of water uses, mainly within regions subject to frequent water scarcity problems as the Capibaribe River basin.

KEY-WORDS: Water resources system planning and management; integrated modeling; performance measures.

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xv
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2	
OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo geral	5
2.2 Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 3	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1 Sustentabilidade, conflito e gestão de recursos hídricos	7
3.1.1 Sustentabilidade de recursos hídricos	7
3.1.2 Conflitos de recursos hídricos	10
3.1.3 Gestão de recursos hídricos	13
3.2 Técnicas de análise de sistemas de recursos hídricos	16
3.2.1 Simulação	18
3.2.2 Otimização	19
3.3 Modelos de simulação da operação de reservatórios	21
3.4 Modelos de otimização da operação de reservatórios	27
3.4.1 Modelos de programação linear	28
3.4.2 Modelos de programação dinâmica	30
3.4.3 Modelos de programação não linear	32
3.5 Modelos conjunto de simulação-otimização	34
3.5.1 Modelos de rede de fluxo	35

3.6 - Considerações sobre a irrigação e sobre a prática da piscicultura em reservatórios.....	38
3.6.1 Irrigação	38
3.6.2 Piscicultura	43
3.6.3 Outras considerações.....	45

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO	48
4.1 Aspectos do abastecimento de água da RMR	49
4.1.1 Demanda e déficit de abastecimento de água da RMR	53
4.2 Aspectos do abastecimento de água na região de influência do reservatório Jucazinho	55
4.3 A bacia do rio Capibaribe	58
4.3.1 Localização	58
4.3.2 Hidrografia	58
4.3.3 Área, Divisão Político-Administrativa, População	60
4.3.4 Clima	60
4.3.5 Geologia e solos	60
4.3.6 Vegetação, relevo, uso do solo	61
4.3.7 Os recursos hídricos	63
4.3.7.1 Vazões	63
4.3.7.2 O problema das enchentes	64
4.3.7.3 Infra-estrutura hidráulica existente	65
4.3.7.4 Qualidade das águas superficiais	68
4.3.7.5 Águas subterrâneas	72
4.3.8 Rede pluviométrica	74
4.3.9 Rede fluviométrica	74
4.3.10 Rede climatológica	74
4.3.11 O sistema produtivo	76

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA E ESTRUTURAÇÃO DA MODELAGEM	78
5.1 Generalidades	78
5.2 Os modelos adotados no estudo	79

5.2.1 - O modelo ORNAP	79
5.2.1.1 Da agricultura irrigada	81
5.2.1.2 Dos reservatórios e seus componentes	85
5.2.1.3 De outros componentes do sistema	87
5.2.1.4 Análise de convergência da otimização	87
5.2.2 O modelo de rede de fluxo AcquaNet	89
5.2.2.1 Aspectos teóricos	91
5.3 Estruturação do sistema hídrico para a modelagem	93
5.3.1 Estruturação para o ORNAP	94
5.3.2 Estruturação para o AcquaNet	95
5.4 Medidas de desempenho do sistema	96
5.4.1 - Confiabilidade	97
5.4.2 - Resiliência	98
5.4.3 - Vulnerabilidade	99
5.4.4 - Sustentabilidade	99

CAPÍTULO 6

DADOS DO SISTEMA	100
6.1 Generalidades	100
6.2 Dados do sistema	100
6.2.1 Precipitação	100
6.2.1.1 Precipitação no sub-sistema Jucazinho – Carpina	100
6.2.1.2 Precipitação no sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una ..	102
6.2.2 Vazões afluentes	102
6.2.2.1 Vazões no sub-sistema Jucazinho-Carpina	102
6.2.2.2 Vazões no sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una	105
6.2.3 Evaporação nos reservatórios	106
6.2.4 Dados dos reservatórios	107
6.2.4.1 Relações cota - área – volume	108
6.2.4.1.1 Reservatório Jucazinho	108
6.2.4.1.2 Reservatório Carpina	109
6.2.4.1.3 Reservatório Tapacurá	110
6.2.4.1.4 Reservatório Goitá	110

6.2.4.1.5	Reservatório Várzea do Una	111
6.2.4.2	Volumes máximos e mínimos de armazenamento	112
6.2.4.3	Tomadas d'água, descarregadores e vertedouros	113
6.2.4.3.1	Reservatório Jucazinho	113
6.2.4.3.2	Reservatório Carpina	114
6.2.4.3.3	Reservatórios Tapacurá-Goitá-Várzea do Una	114
6.2.4.4	Fichas técnicas das barragens.....	116
6.2.4.4.1	Barragem de Jucazinho.....	116
6.2.4.4.2	Barragem de Carpina.....	117
6.2.4.4.3	Barragem do Tapacurá.....	119
6.2.4.4.4	Barragem do Várzea do Una.....	120
6.2.4.4.4	Barragem do Goitá.....	120
6.2.5	Demandas hídricas	121
6.2.5.1	Abastecimento	122
6.2.5.2	Irrigação	122
6.2.5.2.1	Áreas potencialmente irrigáveis	123
6.2.5.2.2	Aptidão agrícola	124
6.2.5.2.3	Dados para estimativa das demandas da irrigação	124
6.2.5.3	Vazão ecológica	130
6.2.6	Dados da piscicultura	132

CAPÍTULO 7

CENÁRIOS DE ESTUDO	134	
7.1	Generalidades	134
7.2	Situações climáticas	134
7.3	Cenários idealizados para o ORNAP	137
7.3.1	Situações operacionais dos reservatórios	138
7.3.2	Pressupostos observados no processo de otimização	138
7.3.3	Descrição dos cenários	139
7.3.3.1	Sub-sistema Jucazinho-Carpina	139
7.3.3.1.1	Outros dados de entrada	140
7.3.3.2	Sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una	142
7.4	Cenários idealizados para o AcquaNet	143

7.4.1	Situações operacionais dos reservatórios	146
7.4.2	Descrição dos cenários	147
7.4.3	Sustentabilidade	149

CAPÍTULO 8

RESULTADOS E DISCUSSÃO	150
8.1 Resultados da aplicação do ORNAP	150
8.1.1 Resultados do sub-sistema Jucazinho-Carpina	150
8.1.1.1 Resultados do Cm1	150
8.1.1.1.1 Agricultura irrigada	150
8.1.1.1.2 Piscicultura	153
8.1.1.1.3 Comportamento dos reservatórios	153
8.1.1.1.4 Análise de convergência do processo iterativo	156
8.1.1.2 Resultados do Cm2	156
8.1.1.2.1 Agricultura irrigada	156
8.1.1.2.2 Piscicultura	157
8.1.1.2.3 Comportamento dos reservatórios	158
8.1.1.2.4 Análise de convergência do processo iterativo.....	158
8.1.1.3 Resultados do Cm3	159
8.1.1.3.1 Agricultura irrigada	159
8.1.1.3.2 Piscicultura	160
8.1.1.3.3 Comportamento dos reservatórios	160
8.1.1.3.4 Análise de convergência do processo iterativo.....	161
8.1.1.4 Resultados do Cm4	161
8.1.1.4.1 Agricultura irrigada	161
8.1.1.4.2 Piscicultura	164
8.1.1.4.3 Comportamento dos reservatórios	164
8.1.1.4.4 Análise de convergência do processo iterativo.....	166
8.1.1.5 Síntese dos resultados para a situação climática média no sub-sistema Jucazinho-Carpina.....	167
8.1.1.6 Resultados para a situação para a climática seca no sub-sistema Jucazinho-Carpina	169
8.1.1.6.1 Piscicultura.....	171

8.1.1.6.2 - Comportamento dos reservatórios.....	171
8.1.1.6.3 Análise de convergência do processo iterativo.....	173
8.1.2 Resultados do sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una	173
8.1.2.1 Síntese dos resultados da situação climática média	173
8.1.2.1.1 Agricultura irrigada	173
8.1.2.1.2 Piscicultura	175
8.1.2.1.3 Comportamento dos reservatórios	176
8.1.2.1.4 Análise de convergência do processo iterativo.....	179
8.1.2.2 Síntese dos resultados da situação climática seca	180
8.1.2.2.1 Agricultura irrigada	180
8.1.2.2.2 Piscicultura	181
8.1.2.2.3 Comportamento dos reservatórios	182
8.1.2.2.4 Análise de convergência do processo iterativo.....	182
8.2 Resultados da aplicação do AquaNet	183
8.2.1 Situação climática média.....	183
8.2.1.1 Comportamento dos perímetros de irrigação.....	184
8.2.1.2 Comportamento dos reservatórios e outros elementos.....	185
8.2.1.3 Avaliação de desempenho do sistema hídrico.....	190
8.2.1.3.1 Confiabilidade.....	190
8.2.1.3.2 Resiliência.....	191
8.2.1.3.3 Vulnerabilidade.....	191
8.2.1.3.4 Sustentabilidade.....	192
8.2.2 Situação climática seca.....	193
8.2.2.1 Comportamento dos perímetros de irrigação.....	194
8.2.2.2 Comportamento dos reservatórios e outros elementos.....	195
8.2.2.3 Avaliação de desempenho do sistema hídrico.....	197
8.2.2.3.1 Confiabilidade.....	197
8.2.2.3.2 Resiliência.....	198
8.2.2.3.3 Vulnerabilidade.....	198
8.2.2.3.4 Sustentabilidade.....	199

CAPÍTULO 9	
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	201
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	206
ANEXO 1	220
ANEXO 2	222
ANEXO 3	224

LISTA DE FIGURAS

Figura		Pag.
Figura 3.1	Diagrama das tendências quanto à complexidade de um modelo matemático	18
Figura 3.2	Configuração de um modelo de simulação	19
Figura 3.3	Subdivisão do armazenamento em um reservatório de múltiplos usos	22
Figura 3.4	Curvas guia para um reservatório de múltiplos usos	23
Figura 3.5	Esquema seqüencial de simulação-otimização	35
Figura 4.1	O sistema Tapacurá e a localização dos reservatórios	48
Figura 4.2	RMR: Sistemas de produção e abastecimento de água	50
Figura 4.3	Captação de Tiúma (vista pela margem esquerda do Capibaribe)	53
Figura 4.4	Captação de Castelo (margem direita do Capibaribe)	53
Figura 4.5	Distribuição de água por carro-pipa	55
Figura 4.6	Uso do carro de boi para transporte de água	56
Figura 4.7	Uso de jumentos para transporte de água	56
Figura 4.8	Arranjo esquemático do sistema adutor de Jucazinho	57
Figura 4.9	Unidades de Planejamento Hídrico do Estado de Pernambuco	58
Figura 4.10	Bacia do rio Capibaribe e a localização dos reservatórios em estudo	59
Figura 4.11	Mapa geológico	62
Figura 4.12	Relevo e cobertura vegetal	62
Figura 4.13	Cenas de áreas inundadas pela cheia de 1975 na cidade de Recife	65
Figura 4.14(a)	Barragem Jucazinho	66
Figura 4.14(b)	Jucazinho sangrando	66
Figura 4.14(c)	Barragem Tapacurá	66
Figura 4.14(d)	Barragem Goitá (montante)	66
Figura 4.14(e)	Barragem Várzea do Una	67
Figura 4.14(f)	Barragem Carpina	67
Figura 4.15	Vista de jusante da adutora e válvula dispersora de Jucazinho	67
Figura 4.16	Estações de monitoramento dos corpos d'água do Capibaribe	68
Figura 4.17	Relação entre o IET e o volume do Tapacurá	72
Figura 4.18	Relação entre a clorofila e o e o volume do Tapacurá	72
Figura 4.19	Postos pluviométricos na bacia do Capibaribe	74
Figura 4.20	Diagrama Unifilar da rede fluviométrica da bacia do Capibaribe	75

Figura 5.1	Sistema físico representativo da aplicação do ORNAP	80
Figura 5.2	Fluxograma de funcionamento do modelo ORNAP	88
Figura 5.3	Representação de um sistema como uma rede de fluxo	89
Figura 5.4	Configuração do sub-sistema Jucazinho-Carpina para o ORNAP	94
Figura 5.5	Representação do sub-sistema Tapacurá - Goitá - Várzea do Una	95
Figura 5.6	Sistema de rede de fluxo do sistema hídrico em estudo no AquaNet	96
Figura 5.7	Definição de duração e de volume de déficit em um período de falhas	98
Figura 8.1	Participação de cada cultura na formação RL anual otimizada no Cm1	152
Figura 8.2	Variação de vazões mensais demandadas pela irrigação no Cm1	152
Figura 8.3	Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cm1	154
Figura 8.4	Variação de volume afluente, demandas atendidas por Jucazinho no Cm1	155
Figura 8.5	Variação de volume afluente e demandas atendidas por Carpina no Cm1	155
Figura 8.6	Áreas otimizadas totais por cultura para o Cm4	163
Figura 8.7	Participação de cada cultura na formação da RL anual otimizada no Cm4	163
Figura 8.8	Volume médio mensal evaporado no reservatório Jucazinho (Cm4 x Cm2)	165
Figura 8.9	Volume médio mensal evaporado no reservatório Carpina (Cm4 x Cm2)	166
Figura 8.10	Variação de volumes nos reservatórios Jucazinho e Carpina no Cs1	172
Figura 8.11	Variação de volumes nos reservatórios Jucazinho e Carpina no Cs2	172
Figura 8.12	Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cm5	176
Figura 8.13	Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cm6	177
Figura 8.14	Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cm7	177
Figura 8.15	Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cs4	182
Figura 8.16	Curvas de permanência em Jucazinho (volume final, meta e vertido)	186
Figura 8.17	Volume finais, volume meta e vazões efluentes do Carpina	187
Figura 8.18	Curva de permanência no Goitá (volumes finais, meta e evaporado)	187
Figura 8.19	Curva de permanência no Tapacurá (volume final, meta e evaporação)	188
Figura 8.20	Volume finais, volume meta e vazões efluentes do Várzea do Uma	188
Figura 8.21	Curva de permanência de vazões na EEAB Tiuna e Castelo	189
Figura 8.22	Curva de permanência de demandas no nó FinalMar	189
Figura 8.23	Reservatório Jucazinho (Volume final e de meta, vazão para irrigação de Trapia, volumes vertidos)	196
Figura 8.24	Comportamento do reservatório Carpina (situação de seca)	196
Figura 8.25	Curvas de permanência nos reservatórios Goitá, Tapacurá e Várzea do Una (volume final, volume meta)	197

LISTA DE TABELAS

Tabela	Pag.	
Tabela 4.1	Oferta de água de cada sistema produtor no abastecimento da RMR	55
Tabela 4.2	Demanda e déficit de água na RMR	58
Tabela 4.3	Principais afluentes do rio Capibaribe	63
Tabela 4.4	Vegetação / Uso do Solo na bacia do rio Capibaribe	66
Tabela 4.5	Vazões médias (potencialidades) da bacia do rio Capibaribe	67
Tabela 4.6	Parâmetros de cheias recentes do rio Capibaribe	68
Tabela 4.7	Principais reservatórios da bacia do Capibaribe	70
Tabela 4.8	Qualidade da água do rio Capibaribe	73
Tabela 4.9	Qualidade da Água em Função do IQA	74
Tabela 4.10	Resultados de análises de águas do reservatório Jucazinho	75
Tabela 4.11	Resultados de análises de águas do reservatório Carpina	75
Tabela 4.12	Parâmetros estatísticos de poços do cristalino na bacia do Capibaribe	77
Tabela 4.13	Classificação das águas do cristalino para os diversos usos	77
Tabela 4.14	Evaporação média mensal registrada em estações da bacia do Capibaribe	79
Tabela 5.1	Tipos de arcos e respectivos limites inferiores, limites superiores e custos	97
Tabela 6.1	Precipitação média anual nos postos-referência do sub-sistema Jucazinho-Carpina (dados homogeneizados)	106
Tabela 6.2	Precipitação média nas bacias dos reservatórios Jucazinho e Carpina	106
Tabela 6.3	Precipitação nas bacias dos reservatórios Tapacurá, Goitá, Várzea do Una	107
Tabela 6.4	Parâmetros do escoamento superficial em Toritama e Limoeiro	108
Tabela 6.5	Vazões afluentes médias mensais aos reservatórios	110
Tabela 6.6	Vazões afluentes médias mensais	111
Tabela 6.7	Lâminas corrigidas (mm) de evaporação média mensal nos reservatórios	112
Tabela 6.8	Volumes máximos e mínimos operacionais para Jucazinho e Carpina	117
Tabela 6.9	Volumes máximos e mínimos operacionais	117
Tabela 6.10	Dados das tomadas d'água para os reservatórios	120
Tabela 6.11	Dados dos descarregadores dos reservatórios	120
Tabela 6.12	Dados dos descarregadores para ETA	120
Tabela 6.13	Dados dos vertedouros	120

Tabela 6.14	Demandas do abastecimento urbano	127
Tabela 6.15	Precipitação média mensal (mm)	130
Tabela 6.16	Precipitação média mensal (mm)	130
Tabela 6.17	Kc das culturas dos perímetros Trapiá, Carpina e Várzeas – Passira	130
Tabela 6.18	Kc das culturas dos perímetros Tapacurá, Goitá e Várzea do Una	131
Tabela 6.19	Plano cultural anual para o perímetro Trapiá	131
Tabela 6.20	Plano cultural anual para o perímetro Carpina	131
Tabela 6.21	Plano cultural anual para o perímetro Várzeas – Passira	132
Tabela 6.22	Plano cultural anual para os perímetros Tapacurá, Goitá, Várzea do Una	132
Tabela 6.23	Produtividade das culturas	132
Tabela 6.24	Dados dos sistemas de irrigação	133
Tabela 6.25	Dados de áreas máximas e mínimas de cada cultura por perímetro (ha)	134
Tabela 6.26	Custo médio de produção das culturas (incluindo energia elétrica)	134
Tabela 6.27	Preço médio de venda das culturas	135
Tabela 7.1	Precipitação nos reservatórios do sub-sistema Jucazinho-Carpina	140
Tabela 7.2	Precipitação (mm) nos perímetros para a situação climática média	140
Tabela 7.3	Precipitação (mm) nos perímetros para a situação climática seca	140
Tabela 7.4	Precipitação nas situações climáticas média e seca para os reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una	141
Tabela 7.5	Precipitação (mm) nos perímetros para a situação climática média	141
Tabela 7.6	Precipitação (mm) nos perímetros para a situação climática seca	141
Tabela 7.7	Cenários no ORNAP para o Sub-Sistema Jucazinho-Carpina	144
Tabela 7.8	Vazões médias mensais afluentes em Jucazinho e Carpina (sit. climática média)	146
Tabela 7.9	Vazões médias mensais afluentes em Jucazinho e Carpina (sit. climática seca)	146
Tabela 7.10	Cenários no ORNAP para o Sub-Sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una	147
Tabela 7.11	Demandas definidas para os reservatórios no AcquaNet (m ³ /s)	148
Tabela 7.12	Descrição do nós da rede fluxo do sistema hídrico no AcquaNet	150
Tabela 7.13	Descrição dos arcos da rede fluxo do sistema hídrico no AcquaNet	150
Tabela 7.14	Cenários e esquemas de prioridade para alocação de água pelo AcquaNet	152
Tabela 8.1	Área e receita líquida ótimas por cultura e perímetro no Cm1	155
Tabela 8.2	Áreas otimizadas x áreas planejadas para os perímetros no Cm1	155
Tabela 8.3	Grau de utilização das áreas disponíveis de cada perímetro no Cm1	156

Tabela 8.4	Vazões mensais ótimas para os perímetros no Cm1 (m ³ /s)	157
Tabela 8.5	Resultados otimizados para a piscicultura no Cm1	157
Tabela 8.6	Área e receita líquida ótimas anuais, por cultura e perímetro, no Cm2	161
Tabela 8.7	Grau de utilização das áreas disponíveis de cada perímetro no Cm2	161
Tabela 8.8	Vazões mensais ótimas para os perímetros no Cm2 (m ³ /s)	161
Tabela 8.9	Resultados otimizados para a piscicultura no Cm2	162
Tabela 8.10	Volume afluyente e demandas anuais do reservatório Jucazinho no Cm2	162
Tabela 8.11	Receita líquida anual e utilização das áreas de cada perímetro no Cm3	162
Tabela 8.12	Vazões mensais ótimas para os perímetros no Cm3 (m ³ /s)	163
Tabela 8.13	Resultados otimizados para a piscicultura no Cm3	163
Tabela 8.14	Volume afluyente e demandas anuais atendidas em Jucazinho no Cm3	164
Tabela 8.15	Volume afluyente e demandas anuais atendidas em Carpina no Cm3	165
Tabela 8.16	Área e receita líquida anual ótimas, por cultura e perímetro, no Cm4	166
Tabela 8.17	Grau de utilização das áreas disponíveis de cada perímetro no Cm4	166
Tabela 8.18	Vazões mensais ótimas para os perímetros no Cm4 (m ³ /s)	168
Tabela 8.19	Resultados otimizados para a piscicultura no Cm4	168
Tabela 8.20	Demandas e volume afluyente anuais do reservatório Jucazinho no Cm4	169
Tabela 8.21	Volume afluyente e demandas do reservatório Carpina no Cm4	170
Tabela 8.22	Síntese dos resultados da resposta agrícola do sub-sistema Jucazinho-Carpina	171
Tabela 8.23	Vazões médias mensais ótimas para os perímetros nos cenários Cm1 a Cm4	172
Tabela 8.24	Resultados da piscicultura nos reservatórios para a situação climática média	173
Tabela 8.25	Resultados da resposta do sub-sistema Jucazinho-Carpina na seca	174
Tabela 8.26	Áreas otimizadas x áreas planejadas para os perímetros no Cs2	174
Tabela 8.27	Vazões mensais ótimas para os perímetros nos cenários de seca	175
Tabela 8.28	Resultados otimizados para a piscicultura no Cs2	175
Tabela 8.29	Área e receita líquida otimizadas por cenário, cultura e perímetro no ano médio	178
Tabela 8.30	Áreas disponíveis x áreas otimizadas por cenário no ano médio	179
Tabela 8.31	Vazões médias mensais ótimas para os perímetros (Cenários Cm5, Cm6 e Cm7)	179

Tabela 8.32	Resultados da piscicultura extensiva na situação climática média	180
Tabela 8.33	Vazões e demandas (em m ³ /s) de cada reservatório para o cenário Cm5	182
Tabela 8.34	Vazões e demandas (em m ³ /s) de cada reservatório para o cenário Cm6	183
Tabela 8.35	Vazões e demandas (em m ³ /s) de cada reservatório para o cenário Cm7	183
Tabela 8.36	Área e receita líquida otimizadas por cenário, cultura e perímetro na seca	184
Tabela 8.37	Áreas disponíveis x áreas otimizadas por cenário na situação climática seca	185
Tabela 8.38	Vazões médias mensais ótimas para os perímetros nos cenários Cs3 e Cs4	185
Tabela 8.39	Resultados da piscicultura extensiva na situação climática seca	185
Tabela 8.40	Frequência de falhas no atendimento das demandas (situação climática média)	187
Tabela 8.41	Resumo das demandas de irrigação por perímetro e por cenário	188
Tabela 8.42	Volumes iniciais e volumes metas dos reservatórios (situação climática média)	190
Tabela 8.43	Confiabilidade dos pontos de demandas nos cenários (climática média)	194
Tabela 8.44	Resiliência dos pontos de demandas nos cenários (climática média)	195
Tabela 8.45	Vulnerabilidade dos pontos de demandas nos cenários (climática média)	195
Tabela 8.46	Sustentabilidade das demandas de irrigação na situação climática média	196
Tabela 8.47	Receitas líquidas RL anuais otimizadas (cenários do ORNAP)	196
Tabela 8.48	Benefício de cada cenário em função do critério de sustentabilidade	197
Tabela 8.49	Resumo das demandas de irrigação por perímetro e por cenário (seca)	
Tabela 8.50	Volumes iniciais e volumes metas dos reservatórios (situação climática seca)	200
Tabela 8.51	Confiabilidade dos pontos de demandas nos cenários (climática seca)	202
Tabela 8.52	Resiliência dos pontos de demandas nos cenários (climática seca)	202
Tabela 8.53	Vulnerabilidade dos pontos de demandas nos cenários (climática seca)	203
Tabela 8.54	Sustentabilidade das demandas de irrigação na situação climática seca	203
Tabela 8.55	Receitas líquidas RL anuais otimizadas (cenários do ORNAP)	204
Tabela 8.56	Benefício de cada cenário em função do critério de sustentabilidade	204

1 INTRODUÇÃO

Existe evidência clara e convincente de que o mundo enfrenta uma crescente série de problemas locais e regionais relacionados com a quantidade e qualidade da água, que são o resultado, em grande parte, de sua má distribuição, no tempo e nos espaços geográficos territoriais, do desperdício na utilização e da falta de um gerenciamento adequado. Estes fatores, aliados à degradação, fizeram o consumo de água, no último século, crescer mais que o dobro do incremento da população, provocando em algumas regiões uma escassez crônica de recursos hídricos, avaliando-se que morrem, diariamente, cerca de 25.000 pessoas devido à escassez, à contaminação ou ao manejo incorreto das águas, segundo estudos realizados pela Organização dos Estados Americanos (OEA), em 1996.

O pior é que a explosão demográfica e as persistentes agressões ambientais estão agravando as perspectivas, incrementando os interesses e as disputas pela necessidade de compartilhamento de recursos hídricos, o que leva a enfrentamentos com intensidade cada vez maior. No encerramento de uma conferência internacional sobre a passagem do Dia Mundial da Água, realizada pela Organização das Nações Unidas (ONU), em 22 de março de 2001, em Paris, o presidente francês Jacques Chirac chamou atenção para o fato de que “em dezenas de nações da África, do Oriente Médio e da Ásia Central, a água potável tornou-se uma riqueza mais cobiçada que o petróleo, a tal ponto que conflitos pela água colocam, e não é de hoje, mais de 60 países literalmente em pé de guerra”.

No Brasil, nas últimas décadas, desenvolveram-se metrópoles com mais de um milhão de habitantes através de um expressivo processo de urbanização. A contínua e desordenada expansão destes grandes aglomerados urbanos provocam crescentes necessidades de água para atender as populações e, conseqüentemente, o desenvolvimento sócio-econômico. O desperdício e a ausência, de modo geral, de ações eficientes de gerenciamento e preservação dos recursos hídricos limitam sua aptidão e disponibilidade para o atendimento à diversidade de usos, o que exacerba os conflitos entre usuários da águas.

As adversidades climáticas, como períodos um pouco mais prolongados de secas, já revelaram, recentemente, situações dramáticas de disponibilidades de recursos hídricos e provocaram sérios prejuízos econômicos e sociais em várias regiões do País. Um exemplo

desse tipo de problema foi registrado na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), em 1992. Por falta de chuvas, a RMSP, um conglomerado de 18 milhões de habitantes cujo abastecimento público de água potável é feito, principalmente, mediante a utilização de mananciais de superfície, viu-se às portas de racionamento e cortes no abastecimento de água, afetando a qualidade de vida da população, em razão de que as duas principais represas do sistema, Billings e Guarapiranga, encontravam-se em níveis muito baixos. Outro exemplo, ao longo do ano de 1999, foi verificado na Região Metropolitana de Recife (RMR), em Pernambuco, que integra catorze municípios, com quase 3,3 milhões de habitantes. Com efeito, após dois anos consecutivos de seca (1998 e 1999), que provocou uma redução da ordem de 51% na capacidade de produção de água bruta de todo do sistema público de abastecimento, gerando um déficit da ordem de 63% em relação à demanda, a população da RMR experimentou severo racionamento na oferta de água, representado, em média, por um dia com água por outros nove dias com torneiras vazias.

Problemas de escassez e poluição da água, como os da RMSP e RMR, têm exigido dos governos e da sociedade uma maior atenção para o assunto, o que induz a uma procura incessante por fontes complementares de água e força a busca por financiamentos para investimentos em novas obras de aproveitamento hídrico. Entretanto, investimentos no setor hídrico oneram sobremaneira os cofres públicos e reduz o potencial de investimento em outras áreas também carentes, face às necessidades da sociedade. Em países desenvolvidos, onde a construção de grandes reservatórios experimenta franca decadência, observa-se que o foco das atenções, mais recentemente, está voltado para a valorização da eficiência operacional de sistemas de reservatórios já existentes, visando maximizar os benefícios advindos de usos das suas disponibilidades hídricas.

Dentro das diferentes obras hidráulicas que podem ser projetadas e construídas para alocação da água para diferentes usos, os reservatórios têm adquirido grande relevância ao longo da história. No Brasil, até recentemente, os reservatórios eram construídos para o uso preponderante da geração de energia. Atualmente, com o advento da Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, ressalta-se a importância da maximização dos benefícios econômicos e sociais resultantes do aproveitamento múltiplo dos recursos hídricos. Tal aproveitamento é factível de ser alcançado, mediante a utilização de ferramentas que possibilitem um gerenciamento das disponibilidades hídricas de forma a garantir o suprimento de água para as mais variadas demandas, seja para o abastecimento de cidades e indústrias, a geração de

energia elétrica, a irrigação, os usos ligados à recreação e lazer das pessoas, o controle de cheias e o controle da poluição hídrica.

A modelagem matemática que suporta o planejamento e o gerenciamento de reservatórios utiliza-se, regra geral, de modelos de simulação e de otimização, embora já não sendo tão mais aceitável a utilização, apenas, de um modelo de simulação, ou de um modelo clássico de otimização com apenas um objetivo como, por exemplo, a maximização da eficiência econômica. Seguindo as novas tendências no tratamento dos problemas de recursos hídricos, torna-se necessária uma subdivisão de objetivos mais genéricos em atributos que possam, de alguma forma, ser quantificados, permitindo a consideração de aspectos econômicos, sociais, políticos, ambientais e outros. Os modelos que contemplam este tipo de análise são denominados de modelos multicritérios, em que os vários atributos são considerados, não procurando uma solução que otimize um único objetivo, mas sim, uma solução de compromisso entre os vários atributos para favorecer que a tomada de decisão sobre os recursos hídricos seja a melhor, tanto nos aspectos técnico e ambiental como eticamente sustentável.

No setor de recursos hídricos do Nordeste brasileiro, há carência da prática de metodologias que visem analisar dois dos principais problemas relacionados a reservatórios já existentes, que são: a alocação ótima de disponibilidades hídricas e a reavaliação de regras operacionais, relacionando critérios de sustentabilidade. Nos últimos anos, técnicas modernas de gestão de recursos hídricos vêm sendo difundidas e aplicadas à alocação de recursos hídricos, que são escassos e competitivos, voltados à promoção do desenvolvimento sócio-econômico da região. O uso dessas técnicas no dimensionamento e operação da infra-estrutura hídrica regional, entretanto, é ainda limitado, embora se saiba que sua aplicação pode permitir o aumento da eficiência econômica dos investimentos.

Nesta linha de pensamento, a presente pesquisa tem a finalidade prática de explorar uma abordagem que combine a técnica de otimização, através de modelo baseado em programação não linear, e a técnica de simulação, incorporando-se o uso de indicadores de desempenho para classificação e seleção de alternativas operacionais, para subsídio à decisão na alocação ótima das águas de um sistema de recursos hídricos formado por cinco reservatórios e perímetros de irrigação, localizados na bacia do rio Capibaribe, no Estado de Pernambuco. O esquema metodológico adotado, circunscrito à área de influência dos reservatórios Jucazinho,

Carpina, Goitá, Tapacurá e Várzea de Una, mostrou-se adequado e busca diminuir a lacuna ainda existente entre os desenvolvimentos teóricos e a prática da análise e operação de sistemas de reservatórios. Os resultados alcançados podem subsidiar políticas para o gerenciamento da operação dos reservatórios e auxiliar na melhoria da eficiência do uso da água em regiões submetidas a freqüentes problemas de oferta hídrica.

2 OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho está voltado à busca de conhecimento para auxílio à tomada de decisão em problemas envolvendo planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, pela aplicação conjunta de técnicas de otimização e simulação, incorporando-se o uso de indicadores de desempenho para classificação de cenários de planejamento e seleção de alternativas, visando subsidiar a análise da operação integrada e a alocação ótima das águas de um sistema de recursos hídricos formado por cinco grandes reservatórios - Jucazinho, Carpina, Goitá, Tapacurá e Várzea de Una, localizados na bacia do rio Capibaribe, no Estado de Pernambuco, quando sujeitos a usos e objetivos múltiplos.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos, podem ser relacionados:

- Prognosticar linhas de ação que visem desenvolver a economia da região de influência dos reservatórios, com ampliação da oferta e uso ótimo da água em atividades rurais, como a irrigação e a piscicultura, com produção de alimentos e geração de emprego e renda, atendidos outros requerimentos hídricos, de tal forma que a escassez hídrica relativa não continue constituindo um impedimento ao desenvolvimento sustentável da região;
- Idealizar perímetros irrigados em função da aptidão agrícola dos terrenos, da tradição de plantio da região e de parâmetros econômicos de produção e venda das culturas selecionadas, com vistas à maximização dos benefícios financeiros líquidos advindos da agricultura irrigada, e a geração de empregos;
- Adotar critérios e parâmetros econômicos para a avaliação da produção piscícola, pela prática da piscicultura extensiva nos reservatórios com vistas à maximização dos benefícios financeiros líquidos advindos dessa atividade, e a geração de empregos;
- Analisar e diagnosticar o desempenho do sistema de reservatórios, sob a forma integrada, quando sujeito a diferentes cenários operacionais envolvendo aspectos hidroclimáticos, de demandas dos múltiplos usos da água, do controle de cheias e de requerimentos ambientais.

- Analisar regras de operação para o sistema de reservatórios com vistas à viabilização de aportes de água para reforço do abastecimento da cidade de Recife;
- Analisar a sustentabilidade relativa do sistema de reservatórios pela aplicação dos conceitos de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, importantes para auxiliar no processo decisório da operação, de maneira a possibilitar a identificação das melhores alternativas de usos múltiplos das disponibilidades hídricas;
- Prover subsídio metodológico que possa ser utilizado em sistemas de reservatórios com vistas à escolha de políticas operacionais que possam melhorar a eficiência do uso da água em regiões com escassez hídrica, minimizando problemas peculiares de déficit hídrico e os conflitos de uso da água.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – SUSTENTABILIDADE, CONFLITO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

As duas últimas décadas vêm sendo profundamente marcadas por mudanças de paradigmas que dizem respeito às ciências de recursos hídricos e do meio ambiente, valendo salientar o novo conceito de desenvolvimento sustentável. Ao longo da história, a maioria dos projetos de aproveitamento de recursos hídricos se caracterizou por interferir, prejudicialmente, nos sistemas sócio-ambientais, sempre permeando disputas entre os diversos usos e usuários da água, refletindo competição de poder político ou de discordâncias sobre o desenvolvimento econômico, ou ambos, visto que o aumento da intensidade e variedade dos usos da água, regra geral, fomentam o desequilíbrio entre oferta e demanda. Recentemente, entretanto, vem sendo ampliada a consciência da necessidade de se estudar os problemas relacionados ao recurso natural água sob uma perspectiva sistêmica, ou seja, considerando, no planejamento e desenvolvimento dos projetos, os aspectos sociais, políticos, econômicos, legais e ambientais, o que justifica se compreender a complexa conexão que existe entre sustentabilidade, conflitos e a gestão de recursos hídricos.

3.1.1 – SUSTENTABILIDADE DE RECURSOS HÍDRICOS

Na área do meio ambiente, o novo paradigma do desenvolvimento sustentável foca o gerenciamento ambiental no atendimento das necessidades das gerações atuais e futuras. O desenvolvimento é sustentável, como bem define o Relatório da Comissão Brundtland – Our Common Future (WCDE, 1987), se “ele atende as necessidades do presente sem comprometer a habilidade das gerações futuras em atender as suas próprias necessidades”. No caso dos sistemas de recursos hídricos a sustentabilidade pressupõe um gerenciamento de longo termo, implicando que os mesmos devem ser planejados, projetados e administrados de tal forma que permaneçam funcionais, suportando a vida em todos os níveis biológicos, e que os recursos de água e solo a eles relacionados não sejam irreversivelmente degradados ao longo do tempo (Louks et al., 2000).

Em que pese existir na literatura diversas definições de recursos hídricos sustentáveis, vale referenciar a apontada por Feng (2001), a qual introduz uma nova definição baseada em conceitos de desenvolvimento sustentável e segurança ambiental, como seja: “recurso hídrico sustentável é a água disponível para os usos ambientais e humanos, que pode ser obtida de

alguma fonte hídrica natural, observadas as limitações da combinação de possibilidade tecnológica, eficiência econômica, segurança ambiental, e aceitabilidade humana”. Esta definição é de fato uma extensão daquela já definida pela UNESCO/WMO (1992), focando o gerenciamento de recursos hídricos sustentáveis, a qual considera que recurso hídrico sustentável é “a água disponível ou apta para se tornar disponível, para uso em quantidade e qualidade suficientes para a alocação, em um apropriado período de tempo, no atendimento de uma demanda identificável”. Mediante as definições anteriormente referidas, pode-se cogitar que o gerenciamento sustentável de sistemas de recursos hídricos é função de variados objetivos, como o econômico, o ambiental, o ecológico, o social e físico, e que por isso deve, inevitavelmente, envolver um processo de tomada de decisão, multidisciplinar e multiparticipativo, numa escala espacial e temporal apropriada.

Para atender o desenvolvimento futuro da sociedade e o crescimento populacional, na escala mundial, haverá a necessidade de se ofertar mais água, que se fará, mais significativamente, mediante a construção de novos reservatórios, os quais se constituem em uma das formas mais efetivas de se disponibilizar e controlar os recursos hídricos superficiais. Entretanto, o planejamento, o projeto, a construção e a operação de reservatórios são problemas complexos e difíceis de equacionar, requerendo para tal a participação de especialistas de diversas áreas como a engenharia, economia, física, química, biologia e zoologia, entre outras, mormente quando se focaliza o desenvolvimento sustentável. Considera-se como um reservatório sustentável, aquele que é projetado e gerenciado de acordo com os princípios da sustentabilidade, fazendo parte integral do sistema holístico composto pela sociedade, terra, ar e água (Takeuchi e Kundzewicz, 1998). Como define estes autores, a operação e a manutenção de reservatórios sustentáveis, deve observar, entre outras, práticas de conservação da natureza nas áreas de entorno; de manutenção da vida biótica normal; de controle de sedimentos; de gerenciamento conjunto envolvendo todos os componentes relacionados à bacia e ao sistema de recursos hídricos, de uso de informações e tecnologias de suporte a decisão, com vistas às múltiplas finalidades como o controle de enchentes, o abastecimento, a geração de energia e outros usos, e do controle da qualidade ambiental.

No que diz respeito à determinação do desempenho de reservatórios, quanto a sustentabilidade hídrica, existem vários indicadores e critérios que podem ser utilizados. Critérios de performance, como os índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, foram apresentados por Hashimoto et al. (1982), que têm por base a hipótese de que um sistema hídrico pode ser representado por um processo estocástico e estacionário. Através

desse critérios é possível analisar o desempenho de um sistema hídrico de três maneiras: (1) qual é a frequência de falhas do sistema (confiabilidade), (2) como o sistema retorna ao seu estado satisfatório depois de uma falha (resiliência) e (3) quais as conseqüências que uma falha pode provocar (vulnerabilidade). Similarmente, Ganoulis (1994) define como Índices de Desempenho (ou Performance – PI) medidas que indicam o comportamento do sistema quando condições externas criam efeitos adversos onde, em alguns períodos, incidentes podem ocorrer e acarretar o não cumprimento das funções para as quais o reservatório se propôs, configurando assim uma situação de falha do sistema. Takeuchi e Kundzewicz (1998) comentam que muitos critérios para a tomada de decisão sustentável para reservatórios ainda não estão em prática, e enfatizam que a integridade ambiental, por exemplo, é difícil de definir sob uma forma operacional, embora referenciem idéias de critérios de sustentabilidade que levam em conta as interferências antrópicas.

Quatro critérios desenvolvidos para a tomada de decisão em termos de recursos hídricos sustentáveis, com aplicação ao manejo de reservatórios - imparcialidade (equidade), reversibilidade, risco e consenso, são recomendados por Simonovic et al. (2001), como sejam: (1) Equidade (ou imparcialidade) que, de uma maneira geral, pode ser interpretada como uma combinação de justiça, igualdade e objetivos, que visa assegurar a manutenção do bem-estar social e a aceitabilidade, por parte dos atores afetados, de um determinado projeto de recursos hídricos; para a quantificação da equidade, Lance et al. (1997) apud Simonovic (2001), desenvolveram método de avaliação para diferentes alternativas de projeto, considerando-a como uma medida da distribuição dos impactos associados com o desenvolvimento, tanto no tempo quanto no espaço, em relação à geração atual ou a população futura, (2) Reversibilidade: é vista como uma medida, ou grau, pela qual o conjunto de impactos, previstos e não previstos, podem ser mitigados – um projeto de reservatório de alto grau de reversibilidade requer a imposição de um mínimo valor de distúrbio no ambiente natural; (3) Risco: é uma medida da magnitude dos impactos negativos associada à probabilidade com que esses impactos podem ocorrer, podendo ser estimada usando-se a combinação de dados históricos e empíricos, conhecimento heurístico e percepções culturais; (4) Consenso: o consenso, em geral definido como um acordo de opiniões, não tem unidade de medida e resulta como um critério de alto nível uma vez que depende de julgamento, qualitativo e subjetivo, a ser conduzido pelos atores envolvidos. Uma definição mais geral para o consenso, com relação à sustentabilidade de reservatórios, como referida por Takeuchi e Kundzewicz (1998), diz que “o consenso é um compromisso equitativo (justo), estabelecido em um breve

momento do tempo, que se caracteriza robusto em relação às incertezas do gerenciamento do reservatório e às perspectivas dos atores envolvidos”.

Outras definições e algumas aplicações de índices de sustentabilidade para uso na análise de sistemas de recursos hídricos são propostas nas pesquisas de Matheson et al. (1997), Azevedo et al. (2000), e Loucks (1997) apud Kjeldsen e Rosbjerg (2001). No Brasil, podem ser referenciados: as pesquisas de Mauad (2000), Peixoto (2002), Lima et al. (2003) e Paixão et al. (2003), os quais analisaram os resultados de seus estudos através do uso dos índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade introduzidos por Hashimoto et al. (1982); o trabalho de Silva et al. (2002), que apresentaram uma metodologia para o planejamento do uso da água na bacia do rio Gramame, no Estado da Paraíba, utilizando os índices de sustentabilidade definidos por Vieira (1995), e os estudos de Junior e Lanna (2002), que aplicaram índices de comportamento definidos pelos “somatórios dos valores dos déficits” e “somatório do quadrado dos valores dos déficits”, baseados diretamente na quantidade de falhas e nos déficits de atendimento às demandas previstas, para estudo do comportamento operacional de reservatórios na bacia do rio Curu, no Estado do Ceará.

3.1.2 – CONFLITOS DE RECURSOS HÍDRICOS

Com o aumento da intensidade e variedade dos usos da água, seguidas das persistentes agressões ambientais, observa-se, nas últimas décadas, o agravamento da perspectiva de escassez relativa de água no mundo, o que fomenta desequilíbrios entre oferta e demanda e exacerba os conflitos entre usuários desse importante recurso natural. Esta é a situação presente no Oriente Médio, onde podem ser citadas, entre tantas, as permanentes hostilidades nos povoados e acampamentos que habitam ao longo do rio Jordão; a disputa entre a Turquia e a Síria pelo uso das águas do rio Eufrates; a ameaça de guerra entre o Egito e os seus vizinhos, caso esses persistam no objetivo de obstruir o curso superior do rio Nilo com represas. Como um atestado de que a história moderna é bastante rica em exemplos de conflitos pela água, Gleik (1998) localiza e caracteriza eventos relacionados a conflitos pela água, ao redor do mundo, embora reconheça que os interesses pelos recursos hídricos, raramente na história, têm sido a fonte exclusiva de conflito violento ou de guerra entre países.

Ensejando a compreensão dos conflitos de uso da água, Lanna (1997) estabelece que os mesmos podem ser classificados como: (a) Conflitos de Destinação de Uso, que ocorrem quando a água é utilizada para destinações outras que não aquelas estabelecidas por decisões

políticas, embasadas ou não em anseios sociais; (b) Conflitos de Disponibilidade Qualitativa, situação típica de uso em corpos de água poluídos, onde o consumo excessivo reduz a vazão de estiagem, deteriorando a qualidade das águas já comprometidas pelo lançamento de poluentes, tornando-as ainda mais inadequada para consumo; (c) Conflitos de Disponibilidade Quantitativa, que decorrem do esgotamento da disponibilidade quantitativa devido ao uso intensivo das reservas hídricas resultando, em alguns casos, o seu esgotamento.

No Brasil, diversos são os casos onde água, conflito e segurança social se entrecruzam, valendo referenciar, pelo seu histórico potencial conflituoso e atualidade, a grande questão que é a transposição das águas do rio São Francisco para o Nordeste Setentrional do País. A idéia da transposição de águas do rio São Francisco, cogitada inicialmente para a bacia do rio Jaguaribe, na então Província do Ceará, recebeu sua primeira manifestação técnica através do estudo concebido pelo Engenheiro Civil Henrique Guilherme Fernando Halfled, nos idos de 1852 a 1854, a partir no documento intitulado "*Atlas e Relatório Concernente a Exploração do Rio de S. Francisco, desde a Cachoeira de Pirapora até ao Oceano Atlântico*", levantado por ordem do Governo de Dom Pedro II (Veras, 1998). Apesar dos repetidos estudos técnicos já realizados, mais recentemente a partir da década de 1980, a transferência de águas do rio São Francisco para bacias adjacentes, assumindo a amplitude de um Projeto Nacional, caracteriza-se como uma forte disputa política e de desenvolvimento (conflito entre os setores de geração de energia elétrica, irrigação, abastecimento e meio ambiente), que coloca em confronto interesses do Governo Federal, Estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas (os chamados doadores de água), e os interesse dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Paraíba (os chamados receptores de água).

As disputas atuais pelo uso das águas do rio São Francisco fomentam a continuidade da polêmica em torno dos objetivos do projeto. De um lado (o lado que integra os estados doadores, o comitê de bacia e entidades ambientalistas), cogita-se o apoio à transposição de águas apenas para uso no abastecimento humano e dessedentação animal, concomitantemente ao desenvolvimento de ações de revitalização e de reorientação do desenvolvimento da bacia do São Francisco (e.g.: implementação de programa de conservação e manejo dos solos, controle do desmatamento, inibição de atividades predatórias, conservação e recuperação de matas ciliares, recuperação de hábitat para a fauna fluvial, saneamento básico das cidades ribeirinhas, etc.). Do outro lado (integrando o Governo Federal e os chamados estados receptores), defende-se a idéia de assegurar oferta adequada de água de boa qualidade, com garantia, para a população urbana e rural, e para fomentar atividades econômicas como a agricultura irrigada, piscicultura e criação de camarões nos

vales atravessados pelo projeto, visando melhorar a distribuição geográfica das oportunidades de progresso e bem-estar social, reduzindo riscos de investimentos dos setores privado e público.

No caso da região de influência dos reservatórios Tapacurá, Várzea de Una, Goitá, Carpina e Jucazinho, alvo do presente estudo, existem questões peculiares de déficit hídrico e intensos conflitos quanto ao uso da água. A inexistência de práticas de suporte à decisão para a análise e operação integrada deste sistema de reservatórios concorre, já de longa data, para a carência de disponibilidades hídricas para atender as demandas sempre crescentes, fonte principal das disputas pelo uso da água no contexto do desenvolvimento econômico e social da região. Os conflitos pelo uso da água acumulável naqueles reservatórios podem ser entendidos em dois diferentes planos que envolvem, simultaneamente, atores estatais e não-estatais: (a) no primeiro plano, os conflitos estão caracterizados por interesses da população em ampliar as funções dos reservatórios Carpina e Goitá, originalmente projetados pelo Governo Federal para controle de cheias, no sentido de que estas barragens de contenção passem a operar, também, como reservatórios de regularização; (b) no segundo plano, não menos importante, no que tange ao reservatório de Jucazinho, os conflitos de uso da água estão representados, por um lado, pela existência de fortes pressões políticas no sentido de incluir novas comunidades no seu sistema adutor, ainda em construção; do outro lado, estão os anseios sociais pelo uso intensivo da água para a irrigação de manchas de terras agricultáveis situadas a montante e a jusante do empreendimento, o que pode comprometer a disponibilidade hídrica para o consumo humano, particularmente, por se tratar de uma região de clima semi-árido.

Todas as questões aqui comentadas, sejam as referidas ao plano mundial, sejam as de caráter nacional e regional, como as que envolvem o Projeto São Francisco, ou aquelas que ocorrem na área de influência dos reservatórios da bacia do Capibaribe, evidenciam que há um compromisso intrínseco entre a gestão de recursos hídricos e a busca pela solução e/ou mitigação das disputas pelo uso da água. Este compromisso corrobora as afirmações de Mostert (1998), que dizem que a “gestão hídrica não pode ter apenas a característica de uma atividade técnica e apolítica” e que a “resolução de conflitos é uma componente essencial da prática do gerenciamento em recursos hídricos”.

3.1.3 – GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Na última década, o conceito de gestão tem passado por um processo global de modernização que se intensificou, principalmente, a partir da discussão e lançamento, em fóruns internacionais, de princípios delineadores do novo paradigma que é a gestão integrada de recursos hídricos. Baseado no conceito de que a água é um recurso natural, um bem social e econômico e parte integrante do ecossistema, a OEA (1996) considerou a necessidade de referenciar o conceito de gestão integrada pela evidencia da interdependência entre os setores sócio-político-econômicos e os ecossistemas aquáticos, que incorpora conotações diversas, como abaixo se explicita:

- (i) A integração das fontes de abastecimento (fundamentalmente as águas superficiais e subterrâneas);
- (ii) O escoamento das águas subterrâneas e os estuários;
- (iii) A descentralização dos serviços públicos entre autoridades locais, empresas privadas e comunidades;
- (iv) A participação dos interessados no processo decisório e no planejamento e execução de projetos;
- (v) A integração das demandas setoriais de água, com a integração do planejamento e administração dos recursos hídricos no processo de planejamento nacional;
- (vi) A consideração das necessidades de água dos ecossistemas aquáticos;
- (vii) O ordenamento da zona costeira;
- (viii) O reconhecimento da água como um bem social, ecológico e econômico;
- (ix) A conservação de solos e águas, e a prevenção e redução dos despejos contaminantes;
- (x) A gestão integrada da demanda de água, como instrumento de minimização e resolução de conflitos, com planejamento de contingência para mitigar os efeitos sociais e econômicos dos desastres naturais,
- (xi) O vínculo do desenvolvimento social e econômico e dos usos da terra e da água dentro do contexto das bacias hidrográficas.

A gestão dos recursos hídricos, conforme conceitua Barth (1987), é a forma pela qual se pretende equacionar e resolver as questões de escassez relativa dos recursos hídricos, realizando-se mediante procedimentos integrados, de planejamento e administração (gerenciamento). No planejamento, desenvolvem-se estudos prospectivos visando a adequação do seu uso, controle e grau de proteção desejados pela sociedade, procurando-se alocar a água entre usos múltiplos de forma a obter os máximos benefícios econômicos,

sociais e ambientais. Já na administração (gerenciamento), exercita-se um conjunto de ações destinadas à efetivação do planejamento, que são amparadas em devidos suportes técnicos, jurídicos e administrativos, permitindo ajustes da oferta (gerenciamento da oferta) e da demanda (uso racional) de água, e a adequação de objetivos e metas a novas conjunturas.

O processo de gestão dos recursos hídricos, que deve ser ambientalmente sustentável, pressupõe a existência de três instrumentos fundamentais (ANEEL, 1999):

- (i) A Base Técnica: fundamental pela importância de se ter dados sobre os regimes dos rios e suas sazonalidades, sobre os regimes pluviométricos das diversas regiões hidrográficas, e sobre, ainda, uma série de informações do ciclo hidrológico, cuja análise, consistência e elaboração de produtos decorrentes, tem que ser feita por equipes técnicas formadas de pessoal capacitado, assegurando a confiabilidade e a eficácia da base técnica.
- (ii) O Ordenamento Institucional: que pressupõe, haja vista os domínios e usos da água, bem como as diversas organizações governamentais ou não governamentais ocupadas com a matéria, a montagem de uma estrutura sistêmica para gerenciar os recursos hídricos, que deve valer-se de fóruns ou colegiados, em diversos níveis de poder.
- (iii) A Base Legal: onde, ao lado da base técnica e da estrutura institucional, se definem sólidos fundamentos legais e normas específicas subseqüentes para disciplinar o contexto das relações entre os diversos entes em relação aos recursos hídricos.

Quanto à chamada “Base legal”, merece destaque o recente avanço da política de gestão dos recursos hídricos no Brasil que, embora privilegiado quanto à disponibilidade de recursos hídricos, não contava, até poucos anos atrás, com sistemáticas e abrangentes políticas de gestão integrada de bacias hidrográficas. A história da legislação sobre recursos hídricos no Brasil tem como marco fundamental, além da Constituição Federal, o Código de Águas (Decreto No. 24.643, de 10.07.1934), que ainda é considerado, mundialmente, como uma das mais completas entre as leis de águas já produzidas, embora confira maior ênfase para o aproveitamento do potencial hidráulico para a geração de energia elétrica e a regulamentação dos respectivos serviços de distribuição. Até o início da década de 1980 as preocupações, no Brasil, voltavam-se para o setor hidrelétrico, quando reservatórios deveriam ser construídos em prol do progresso econômico, privilegiando-se as avaliações do tipo custo / benefício, dentro de uma perspectiva analítico-racional, onde as análises de impactos provenientes da ação antrópica eram entendidas sob um enfoque eminentemente técnico-social.

Os recentes avanços da política de gestão dos recursos hídricos no Brasil, segundo Magalhães (1997), podem ser relacionados, inicialmente, ao florescer da conscientização de

preservação ambiental da década de 1980, impulsionados em parte por pressões internacionais, que começou a mostrar que o Brasil, apesar de concentrar cerca de 20% da água doce aproveitável do planeta, não era um eterno paraíso de recursos naturais inesgotáveis, e que já sofria de sérios problemas de degradação ambiental e má distribuição dos recursos hídricos. Condicionam-se estes avanços, ainda, aos resultados do Seminário Internacional sobre Gerenciamento de Recursos Hídricos, realizado no país em 1993; à promulgação da Constituição Federal de 1988; à cooperação franco-brasileira para gestão integrada de bacias hidrográficas, a partir de 1988, e ao advento da Conferência Internacional sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento-ECO 92, no Rio de Janeiro.

A modernização da gestão das águas no Brasil, entretanto, só se tornou efetiva com a promulgação da Lei No. 9.433, de 08.01.1997, que, instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos e criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, tem por fundamentos: i) a água é um bem de domínio público; ii) A água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; iii) Em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; iv) A gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; v) A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e vi) A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

No caso do Estado de Pernambuco, o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SIGRH/PE foi revisto e adequado à legislação federal de recursos hídricos pela Lei No. 12.984/05, de 30 de dezembro de 2005 que, revogando a Lei No. 11.426, de 17 de janeiro de 1997, institui a nova Política Estadual de Recursos Hídricos. Atualmente, o órgão gestor de recursos hídricos de Pernambuco é a Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente - SECTMA, conforme estabelece a Lei Complementar No 049, de 31 de janeiro de 2003. Vinculada à SECTMA está, como órgão de atuação indireta, a Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - CPRH, criada pela mesma Lei Complementar No. 049, que tem por competência, entre outras, a gestão ambiental e de recursos hídricos no Estado de Pernambuco, por meio da execução da Política Estadual do Meio Ambiente e da Política Estadual de Recursos Hídricos.

Como preconizado na Lei 9.433/97, não há mais dúvidas de que qualquer trabalho voltado à gestão de recursos hídricos deva ser focado por bacias hidrográficas. O estudo de

uma bacia hidrográfica deve ser realizado de uma forma integrada através de análises das partes que a compõe, como os rios e reservatórios, os solos, das potencialidades hidroagrícolas e disponibilidades hídricas, das atividades e custos que envolvem os vários usos da água, com o objetivo de minimizar conflitos entre usuários e maximizar os benefícios oriundos de uma política a ser adotada, avaliadas as incertezas do futuro. Tendo em conta o prolongado período que implica o planejamento, o projeto e a construção das grandes obras hídricas, como no caso dos reservatórios da bacia do rio Capibaribe, enfocados no presente estudo, resulta crucial, conforme recomenda a UNESCO (1997), que os tomadores de decisão façam os planos com base na melhor evidência disponível quanto às necessidades futuras da sociedade e da economia.

Por não existir uma metodologia única (padrão) na formulação de um estudo de planejamento de recursos hídricos, dado que os objetivos e sua evolução temporal variam de região para região, inúmeros são os métodos e exemplos de objetivos a atingir, o que obriga a busca de abordagens adequadas para o tratamento e enquadramento de alternativas factíveis de solução técnica, sócio-econômica, ambiental e política. Como aponta Barth (1987), “em razão do tempo de maturação de obras hidráulicas, da vida útil dessas obras e pela repercussão das decisões tomadas alcançarem várias gerações, sendo, muitas vezes, irreversíveis, é necessário um planejamento de longo prazo, pois a alocação dos recursos hídricos entre usos múltiplos é um problema de grande complexidade, cuja solução deve ser procurada com o apoio das técnicas de análise de sistemas”.

3.2 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

As bases da análise de sistemas de recursos hídricos estão assentadas na técnica da pesquisa operacional, introduzida pelos americanos durante a Segunda Guerra Mundial. De acordo com Braga (1987), deve-se ao Havard Water Program, em 1960, a ação pioneira de inserir este tipo de abordagem em planejamento e gestão dos recursos hídricos. A análise de sistemas consiste em decompor qualquer problema de planejamento e operação de sistemas de recursos hídricos em cinco passos:

- (i) Definição dos objetivos;
- (ii) Formulação de medidas quantitativas dos objetivos;
- (iii) Geração de alternativas de solução;
- (iv) Quantificação das alternativas,
- (v) Seleção da alternativa ótima.

Este esquema, em que pese proporcionar as bases para a movimentação desde os objetivos da sociedade para o sistema planejado, de maneira interativa, até a ordenação e escolha final da melhor alternativa, incorpora uma das questões mais discutidas em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos, que é a de como se escolher e formalizar critérios que orientarão a escolha da alternativa ótima. Tucci (1987) cita que para tomar uma decisão com bases científicas, o homem a promove a partir de dois elementos essenciais:

- (i) Informações: que permitem conhecer uma determinada situação que requer sua atuação,
- (ii) Concepção intelectual: simplificação, em geral, do problema, caracterizando quais são suas variáveis e de como elas interagem.

Este último elemento recebeu o nome, já consagrado, de modelo, que é uma representação simplificada do sistema real que se deseja analisar, sendo sistema compreendido como qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação. Entretanto, visto que nenhum processo pode ser completamente observado, alguma expressão matemática que o represente sempre envolverá alguns elementos de incerteza, que devem ser devidamente avaliados.

Overton e Meadows (1976) citam que, em sendo feita uma representação matemática altamente complexa de um sistema, o risco de não representá-lo bem é minimizado, porém a dificuldade de obtenção de uma solução será maximizada, uma vez que os muitos dados requeridos exigirão maior esforço de programação, podendo exceder as disponibilidades de recursos materiais, humanos, financeiros e de tempo. Contrariamente, se uma modelagem matemática mais simplificada é selecionada ou desenvolvida, o risco de não se representar bem o sistema será maximizado, porém a dificuldade na obtenção de uma solução será minimizada. A Figura 3.1 reflete as tendências de decisão quanto ao grau de complexidade de um modelo.

Segundo Lima e Lanna (2005), uma das principais áreas de aplicação dos modelos de análise de sistemas de recursos hídricos é no planejamento e na operação de sistemas de reservatórios. Lanna (1997) considera que são dois os grandes propósitos da análise de sistemas de recursos hídricos, a saber: (i) simular o comportamento da realidade do meio que se deseja representar e estudar, e (ii) otimizar os processos decisórios que atuam sobre a realidade. Estes propósitos dão margem à utilização de duas técnicas mais usuais na análise de sistemas de recursos hídricos, como sejam a simulação e a otimização.

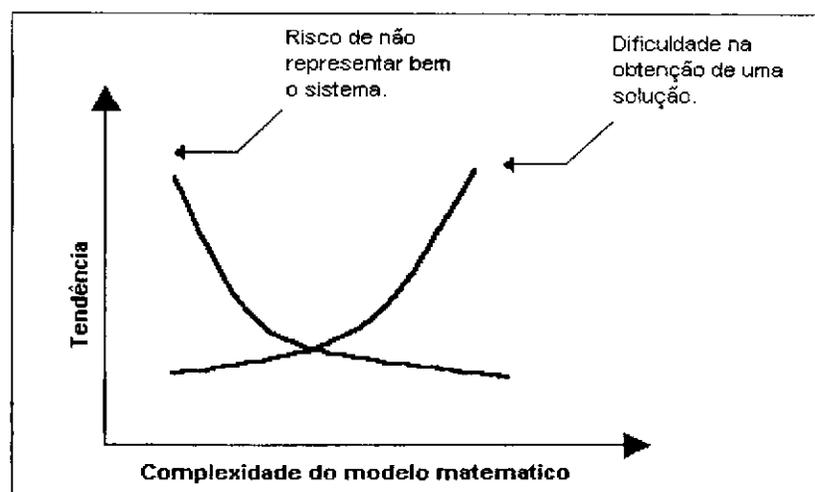


Figura 3.1 - Diagrama das tendências quanto à complexidade de um modelo matemático (Fonte: Overton e Meadows, 1976)

3.2.1 – SIMULAÇÃO

A simulação é uma técnica de modelagem usada para aproximar o comportamento espacial ou temporal de um sistema em um computador, representando as suas principais características por meio de descrições algébricas ou matemáticas (Maass et al., 1962). A principal característica da técnica da simulação é que ela tenta representar um sistema físico e prever seu comportamento sob um determinado conjunto de condições, não apresentando, praticamente, nenhuma exigência quanto à natureza do problema, a não ser a de que ele possa ser formulado matematicamente (Wurbs, 1993).

Os modelos de simulação são classificados em (Hall e Dracup, 1970): modelos físicos, modelos analógicos e modelos matemáticos (analítico ou numérico), definindo-se estes últimos como aqueles em que o sistema físico é representado por um conjunto de expressões, compostas de variáveis e parâmetros, que são resolvidas, regra geral, com a utilização de computadores, sendo por isso cada vez mais utilizados. A sua principal desvantagem está na discretização de processos contínuos e na dificuldade de representação matemática de alguns processos físicos. A Figura 3.2 representa uma configuração de um modelo de simulação, com indicação da participação de um ente no processo – o tomador de decisão, o qual pode ser uma pessoa ou organização, com poderes de analisar, escolher, rejeitar e decidir pela seleção da melhor entre as várias alternativas obtidas pela simulação.

Os modelos de simulação são fáceis de entender e, por esta razão, são amplamente aceitos por altos níveis gerenciais, geralmente constituídos por não especialistas e até mesmo por leigos, sendo, com certeza, a classe de modelos mais amplamente utilizada na análise de

sistemas de recursos hídricos (Roberto e Porto, 1999a). Entretanto, os modelos de simulação são incapazes de encontrar os valores das variáveis de decisão que otimizem os critérios formulados pelo usuário, o que constitui o ponto fraco da técnica. O usuário que desejar encontrar valores ótimos para as variáveis de decisão utilizando um modelo de simulação é obrigado a recorrer aos chamados métodos de força bruta (processos de tentativa e erro), que se baseiam no processamento repetitivo do modelo, de tal forma a exaurir a faixa de valores possíveis das variáveis de decisão. Mesmo assim não se pode garantir que os valores ótimos tenham sido encontrados (Roberto e Porto, 1999a).

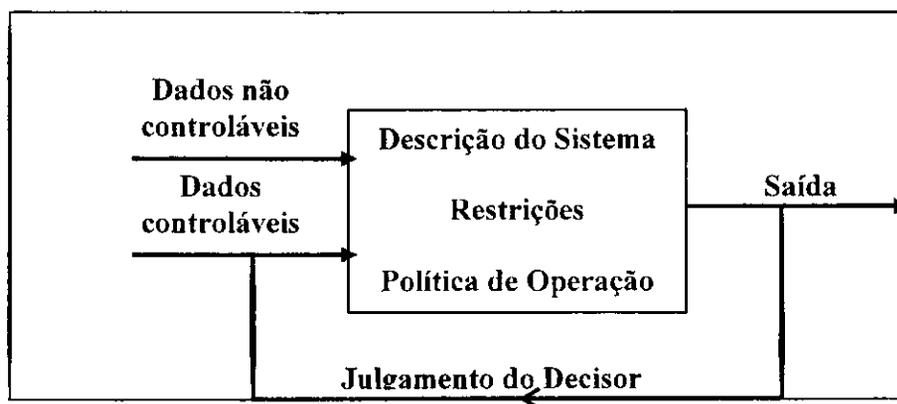


Figura 3.2 - Configuração de um modelo de simulação (Fonte: Porto e Azevedo, 1997)

Segundo Braga Jr. (1987), existem dois tipos básicos de modelos de simulação em recursos hídricos: o primeiro diz respeito à simulação dos processos hidrológicos (exemplo os de transformação de chuva em vazão) e de qualidade da água, onde equações diferenciais e relações empíricas são utilizadas para representação de vários aspectos quantitativos e qualitativos do ciclo hidrológico; o segundo tipo de modelo de simulação é referido aos aspectos de dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos.

3.2.2 – OTIMIZAÇÃO

Em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos, o tipo de problema que exige uma resposta à pergunta “como escolher a alternativa ótima que maximize um índice de eficiência” encontra solução através do uso de modelos de otimização. Estes modelos são representados por um algoritmo formal que é usado para calcular um conjunto de valores para as variáveis de decisão (variáveis que estão sobre o controle do decisor, e que têm influência na solução do problema de otimização) que maximizam ou minimizam uma dada função-objetivo (FO - que é função matemática), sujeita a restrições (representa as limitações dos

recursos disponíveis ou exigências específicas sobre as variáveis), as quais podem ou não ser funções lineares das variáveis de decisão.

A função objetivo de um problema de otimização representa uma forma de valoração do nível de desempenho obtido por mudanças específicas em um conjunto de variáveis de decisão, as quais definem como um sistema está para ser operado (Simonovic, 1992). Aspectos diversos podem ser inseridos na definição de uma função objetivo, por exemplo:

- (i) Custos e prejuízos;
- (ii) Lucros, benefícios diretos e indiretos;
- (iii) Indicadores econômicos e de desenvolvimento;
- (iv) Funções estritamente matemáticas (erros e desvios, calibração de parâmetros de modelos);
- (v) Indicadores sociais.

Em geral, um modelo de otimização para análise de sistemas de recursos hídricos é representado matematicamente por:

$$\text{Max (ou Min) } F(\mathbf{X}) \quad (1)$$

$$\text{submetido a } g_i(\mathbf{X}) = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

onde, $F(\mathbf{X})$ é a função-objetivo (FO), função esta que deve ser otimizada (maximizada ou minimizada); \mathbf{X} é o vetor de variáveis de decisão; e $g_i(\mathbf{X}) = b_i$ são equações que representam as restrições na operação do sistema, sendo b_i parâmetros do modelo.

No caso de reservatórios, as restrições típicas envolvem a equação de conservação da massa (continuidade), armazenamentos máximos e mínimos, limitações impostas pelas tubulações (descarga, adução) e outros equipamentos, obrigações contratuais, legais e institucionais as quais o sistema deve atender (Simonovic, 1992). Define-se como região das soluções viáveis, ou factíveis, o conjunto de todos os vetores de variáveis de decisão que atende às restrições do problema. A solução viável que maximiza ou minimiza a FO de um modelo de otimização é chamada de solução ótima.

Otimizar a regra operativa de um reservatório significa, segundo Barros (1997), definir a descarga operada ótima, para um certo intervalo de tempo, que maximiza (ou minimiza) uma função objetivo e que atende a diversas restrições preestabelecidas, tornando-se um processo bastante complexo quando são considerados fatores como múltiplos reservatórios, múltiplos objetivos, elevado número de restrições e a aleatoriedade dos dados hidrológicos. Loucks et al. (1981) advertem, entretanto, que por melhor que seja a representação matemática, esta será uma aproximação do mundo real, e a solução ótima obtida pelo modelo é, portanto, ótima somente em relação à definição em particular.

A citação de vários modelos de simulação, otimização (inclusive modelos baseados em redes de fluxo) e de modelos conjunto simulação-otimização aplicáveis à operação de reservatórios, como se apresenta a seguir, busca indicar as formulações mais presentes na literatura, tendo a intenção de cobrir todos os modelos existentes. Busca-se prover também, dentro de uma visão mais generalista, informações de aplicações dessas técnicas no campo da análise de sistemas de recursos hídricos.

3.3 - MODELOS DE SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A construção e operação de reservatórios têm como princípio fundamental o desenvolvimento de reserva de água nos períodos de excesso hídrico para seu posterior uso nos períodos de escassez, possibilitando a sua redistribuição espacial e temporal, em quantidade e qualidade. Na sua forma mais simples, o problema do planejamento de reservatórios pode ser resumido pela necessidade da determinação da capacidade de acumulação para atender uma certa demanda, com um nível de confiança aceitável. Na operação de reservatórios com dimensões conhecidas, o objetivo é orientar a programação de acumulações e descargas, que podem variar ao longo do tempo (Zahed, 1984 apud Ribeiro, 1990).

Em todas as situações, entretanto, seja de planejamento ou gerenciamento, o problema básico passa pela necessidade de definir as relações entre as características das aflúncias ao reservatório, a sua capacidade de acumulação, as regras de liberação de água para atendimento das demandas e o grau de confiabilidade desejado para a sua operação. A estrutura básica de um modelo de simulação para representação de um sistema de reservatórios, conforme Yeh (1982) apud Braga Jr. (1987), é dada por:

- (i) Variáveis de entrada: vazões afluentes, precipitações, evaporações e eventuais variáveis exógenas, como restrição de vazões e os limites operacionais dos níveis dos reservatórios;
- (ii) Variáveis de estado: variam ao longo do período de simulação e controlam o comportamento do sistema (e.g., volume armazenado no reservatório);
- (iii) Variáveis de saída: respostas da simulação, escolhidas pelo operador (e.g., custo ou benefício da operação do reservatório, vazões defluentes);
- (iv) Parâmetros do modelo: variáveis que caracterizam o sistema, tais como capacidade dos reservatórios; e
- (v) Intervalo de tempo: deve ser determinado de acordo com as necessidades do estudo, balanceando recursos computacionais e precisão dos resultados.

Geralmente, regras de operação são utilizadas em conjunto com os modelos de simulação as quais, sendo função da previsão de afluências, dos volumes armazenados e defluências em cada intervalo de tempo, definem como o uso da água deve ser administrado. Loucks e Sigvaldason (1982) apud Yeh (1985), sugerem que um ou mais dos seguintes componentes gerais sejam incluídos nestas regras de operação:

- (i) Níveis ou volumes alvo (volumes meta) - estas regras de operação são limitadas à prescrição de volumes de armazenamento no reservatório, enquanto se procura satisfazer as demandas;
- (ii) Zoneamento múltiplo de níveis: a operação é definida para incluir não somente os níveis-meta de armazenamento, mas também as várias zonas de estocagem de água do reservatório onde, para cada uma, corresponde um critério de descarregamento;
- (iii) Faixa de variação do escoamento (faixas de defluência): este componente provê uma relação mais descritiva entre os níveis do reservatório e as vazões nos sistemas de derivação, ou nos canais de jusante (depende do volume armazenado); e
- (iv) Curvas de regras condicionais (curvas guias): definidas para a operação do reservatório não somente em função do volume armazenado, num determinado tempo, mas também como função da previsão das afluências no futuro.

No geral, essas diferentes regras de operação indicam o armazenamento ou descarga alvo que se pretende lograr em determinados períodos de tempo como o diário, semanal, decenal ou mensal (Loucks et al., 1981). No caso da divisão do armazenamento total em diferentes zonas, a Figura 3.3 apresenta um esquema típico de subdivisão de um reservatório de múltiplos usos. Um conjunto de curvas guias típicas de reservatórios pode ser considerado como apresentado na Figura 3.4, segundo Wurbs (1996) apud Bravo et al. (2005).

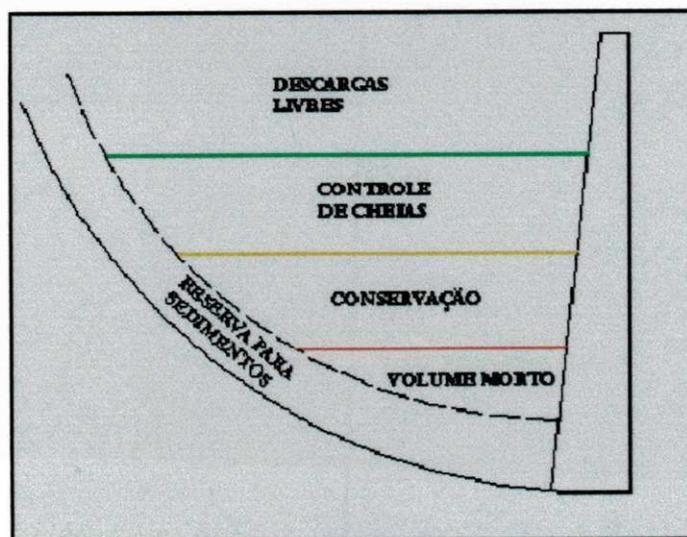


Figura 3.3 - Subdivisão do armazenamento em um reservatório de múltiplos usos

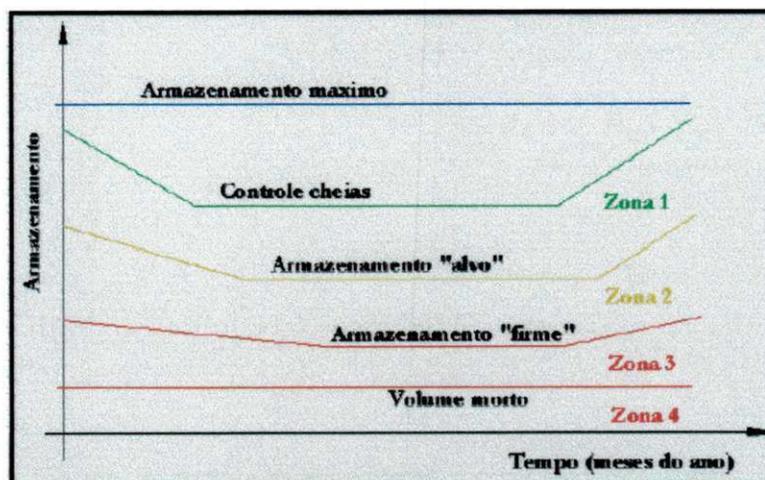


Figura 3.4 - Curvas guia para um reservatório de múltiplos usos

Uma interpretação operacional das curvas da Figura 3.4 (considerados dois usos da água: controle de cheias e a provisão para consumo humano) pode ser feita como: a) se o armazenamento no reservatório está em níveis acima da “curva de controle de cheias”, a demanda de abastecimento seria atendida em 100%, feitas descargas adicionais para trazer o armazenamento aos níveis estipulados pela curva (seria criado um volume vazio no reservatório para amortecer futuras cheias); b) se o armazenamento está na “zona 1”, a demanda de abastecimento poderia ser atendida em 100% e não haveria necessidade de descargas adicionais; c) se o armazenamento encontra-se na “zona 2”, poderia ser iniciado um racionamento de água e assim, por exemplo, a demanda seria atendida em apenas 75% da total; d) na “zona 3”, haveria um maior racionamento, atendendo, por exemplo, apenas 50% da demanda total; e) se o armazenamento estiver na “zona 4” a demanda de abastecimento não será atendida.

Uma aplicação desse tipo de regras na operação de reservatórios de múltiplos usos, como mostrado na Figura 3.4, foi feita por Tu et al., (2003). Lund e Guzman (1999) revisam várias regras comuns à operação de reservatórios, em série e em paralelo, e apontam que, usualmente, essas regras são baseadas na especificação de critérios adequados de operação, considerando:

- (i) sistemas projetados para controle de cheias exigem especial atenção, requerendo um modelo em tempo real para suporte da operação;
- (ii) sistemas utilizados para regularização podem ser abordados através de modelos em base mensal;
- (iii) sistemas de múltiplos usos são estudados no planejamento e operação, predominantemente, através de modelos de simulação, embora possam ser analisados, também, através da aplicação de modelos de otimização.

Na área de recursos hídricos, a literatura registra que a simulação foi usada pela primeira vez pelo U.S. Army Corps of Engineers, em 1953 (Hall e Dracup, 1970). Tratava-se da análise operacional de um sistema hídrico formado por seis reservatórios no rio Missouri, no Estados Unidos da América - EUA, cujo objetivo era maximizar a produção de energia elétrica sujeita às restrições de navegação, controle de cheias e irrigação (Pafford Jr., 1957). Hildebrand (1960) apud Lanna (1982), descreveu um modelo de simulação para o sistema hidroelétrico do rio Columbia, EUA. Manzer e Barnet (1962) fizeram o mesmo para a bacia hipotética do "Harvard Water Program".

Yeh (1985) referencia estudos de simulação realizados por Emery e Meek (1960) para o analisar problemas relacionados ao dimensionamento e operação de reservatórios no vale do rio Nilo, no Egito, e por Hufschmidt e Fiering (1966), que usaram simulação no planejamento de um sistema de reservatórios no rio Lehigh, para múltiplos usos, resultando, mediante o estudo de trinta e cinco configurações, na definição de três diferentes projetos com elevados benefícios quando comparados com sistema existente. Lanna (1982) cita Morrice (1958) que usou um modelo matemático de simulação para maximizar o volume útil de água de irrigação no vale do Nilo, onde foram considerados dezessete reservatórios. Cheng e Hsu (2002) referenciam que Mass et al. (1962) demonstraram a aplicação de técnicas de simulação para avaliar a performance econômica de uma bacia hidrográfica, e que Kuo e Young (1985) usaram simulação estocástica para derivar políticas integradas de operação para os reservatórios Shimen e Feitui, na bacia do rio Tanshui, China.

Diversos estudos de caso de operação de reservatórios, com aplicações de modelos de simulação, genéricos e específicos, incluindo modelos desenvolvidos no Brasil, como o modelo CHEIA, são citados no trabalho de Ribeiro (1990), que usou o modelo HEC-3, do Hydrologic Engineering Center / EUA, para estudar a operação de um sistema formado por dois reservatórios, em série, na bacia do rio Piranhas, no estado da Paraíba. Oliveira e Lanna (1997) desenvolveram e aplicaram o modelo de simulação SIBAC (Modelo de Simulação do Baixo Acaraú), para auxílio na otimização de descargas para atender regras de operação de um sistema de cinco reservatórios, para abastecimento e irrigação, na bacia do rio Acaraú, no estado do Ceará.

Lima e Lanna (2005) consideram que uma questão que provoca discussão no uso de modelos de simulação é saber se vale à pena a utilização de pacotes computacionais genéricos ou se é mais adequado desenvolver um pacote específico para o sistema a ser analisado. Braga Jr. (1987), afirma que o melhor modelo é aquele que o analista conhece e domina. Ainda

segundo este mesmo autor, os modelos genéricos apresentam maior flexibilidade enquanto os específicos são mais rápidos e econômicos.

Entre os pacotes computacionais genéricos de simulação, segundo Yeh (1985), os modelos de simulação HEC-3 (“reservoir system analysis for conservation”) e HEC-5 (“simulation of flood and conservation systems”) desenvolvidos pelo Hydrologic Engineering Center / EUA, em 1971 e 1979, respectivamente, são os com melhores documentações e largamente utilizados. Os dois modelos, que podem operar em base mensal, são similares, sendo que o HEC-5, suportando operação em tempo real, possibilita, além da simulação de sistemas de reservatórios para abastecimentos, a simulação para controle de enchentes. Este mesmo autor referencia ainda outros modelos de simulação como os SIM I e II, do Texas Water Systems (Evason e Mosely, 1970); o ARB - “Arkansas River Basin Model” (Coomes, 1979); o modelo TVA, do Tennessee Valley Authority (Shelton, 1979), e o HSSS - “Hydro System Seasonal Simulator”, desenvolvido pela North Pacific Division / Corps of Engineers (Jones, 1979).

Simonovic (1992), apresentando uma concisa revisão de literatura sobre análise de sistemas de reservatórios, cita que as mais recentes aplicações de modelos de simulação incluem o HEC-3 o HEC-5, do Hydrologic Engineering Center; o ACRES (Sigvaldason, 1976), desenvolvido para avaliar políticas operacionais do sistema de reservatórios do rio Trent, no Canadá; o RESER (Simonovic, 1985) e o IRIS (Loucks et al., 1989). Wurbs (1993) cita como exemplos de modelos de simulação aplicáveis a sistemas específicos os modelos de simulação CRSS - “Colorado river simulation system”, desenvolvido pelo Bureau of Reclamation, nos anos de 1970, e o PRISM - “The Potomac river interactive simulation model”.

Wurbs (1993), mesmo admitindo que são inúmeros os modelos de simulação já desenvolvidos no mundo, referencia como modelos consagrados entre os softwares genéricos de simulação os modelo HEC-5 e HEC-3, do Hydrologic Engineering Center, projetados para serem efetivamente aplicados no planejamento e operação de sistemas de reservatórios. Cita ainda nesta categoria os modelos SWD, de base diária, descrito por Hula (1991) e desenvolvido pela USACE Southwestern Division; o BRASS - “The basin runoff and streamflow simulation”, aplicado por Colon e MacMahon (1987) para simular a operação de controle de cheias de um sistema de reservatórios no rio Savannah; o SSARR - “The streamflow synthesis and reservoir regulation”, aplicado inicialmente para estudos de cheias e projetos de reservatórios (Program 1975) na bacia do rio Columbia; o HYSSR - “The hydro system seasonal regulation”, que é um modelo com rotina seqüencial mensal, desenvolvido

para analisar a operação de um sistema de reservatórios para geração de energia e controle de cheias e o HYSYS - “The hydropower system regulation analysis”, de base mensal, ambos desenvolvidos pela USACE North Pacific Division – NPD; os modelos RESOP II - “reservoir operation quality routing program” (Browder, 1978) e o MITSIM (Strzepek e Garcia, 1989), este capaz de avaliar aspectos econômicos e o desempenho hidrológico de sistemas de recursos hídricos envolvendo a geração de energia, irrigação, o abastecimento de água municipal e industrial, entre outras finalidades.

Outros modelos genéricos de simulação como o WATHNET (Kuczera, 1990), o REALM (Diment, 1991) e o WASP (Kuczera e Diment, 1988), desenvolvidos na Austrália para estudos de planejamento e operação de múltiplos reservatórios, estão citados por Perera e Codner (1996). Nessa mesma categoria são referenciados por Andreu et al. (1991) apud Lima e Lanna (2005), o SIM-V, o MODSIM e o ARSP. Labadie (2004) cita os modelos HEC RESSIM, uma evolução do HEC-5, que inclui uma interface para uso gráfico baseada no Windows (Klipsch et al. 2002), o STELLA (Stein et al., 2001), o POWERSIM (Varvel e Lansey, 2002) e o VENSIM, aplicado por Caballero et al. (2001).

Wurbs (2005), fazendo ampla revisão do estado da arte sobre a modelagem de simulação de bacias hidrográficas e sistemas de reservatórios, com foco na compilação e inventário de modelos genéricos que têm sido aplicados no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, descreve diversos modelos desenvolvidos e mais extensivamente usados nos Estados Unidos da América, seja pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE); ou pelo U.S. Bureau of Reclamation (USBR); ou o Tennessee Valley Authority (TVA), ou outras agências regionais e estaduais de recursos hídricos, institutos de pesquisa e universidades, etc. Entre muitos, são destacados: o HEC-3; o HEC-5; o HEC-PRM; o SSARR; o WRIMS (CALSIM); o StateMOD; o OASIS; o ARSP; o MIKE BASIN GIS; o RIBASIM; o WEAP; o SUPER; o HEC-ResSim; o RiverWare; o WRAP; o PNRRN; o OPSTUDY; o SIMULOP; o IRIS e o IRAS; o HYDROSIM; o PRISM; o MITSIM, o MODSIM.

No trabalho anteriormente citado, o mesmo autor descreve a estrutura computacional e faz uma avaliação comparativa dos cinco modelos de simulação que considera como representativos do estado da arte da modelagem de bacias hidrográficas e sistemas de reservatórios, no geral, e que são particularmente usados em aplicações práticas pelas agências de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos do Estado do Texas: o MODSIM - Generalized River Basin Network Flow Model, desenvolvido pela Colorado State University e Bureau of Reclamation (Labadie et al., 1984); o SUPER - SWD Reservoir System Model, desenvolvido pela USACE Southwestern Division (Hula R. L., 1981); o HEC-ResSim -

Reservoir System Simulation, desenvolvido pela USACE Hydrologic Engineering Center, já na versão 2.0, publicada em 2003; o RiverWare - River and Reservoir Operations, desenvolvido pelo Bureau of Reclamation, Tennessee Valley Authority e Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems (CADSWES); e o WRAP - Water Rights Analysis Package, desenvolvido pela Texas A&M University, Texas Water Resources Institute, Texas Commission on Environmental Quality e USACE Fort Worth District.

3.4 - MODELOS DE OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Nos sistemas de aproveitamento de recursos hídricos superficiais, os reservatórios normalmente estão fisicamente interligados ou agem como componentes de um sistema integrado, resultando em sistemas muito complexos. A simulação, exclusivamente, não é recomendada para a análise desses sistemas, onde, em função de objetivos definidos, busca-se desenvolver as melhores estratégias operacionais (Fletcher e Ponnambalam, 1998). Através da literatura, observa-se que, ao longo das últimas três décadas, muitos estudos foram realizados envolvendo a pesquisa operacional aplicada à operação de reservatórios.

Uma profunda revisão do estado da arte sobre o assunto é oferecida por Yeh (1985), onde o autor destaca os diversos tipos de modelagem para análise de sistemas de reservatórios, dando maior ênfase às técnicas de otimização como a Programação Linear (PL), a Programação Dinâmica (PD) e suas variações (PD estocástica, PD incremental com aproximações sucessivas, PD probabilística), e ainda a Programação Não-Linear (PNL). Nas suas conclusões, Yeh afirma que a PL tem como vantagens: (i) a habilidade para se ajustar e resolver problemas de grandes dimensões; (ii) atinge valores ótimos globais; (iii) a não necessidade de uma política inicial de operação dos reservatórios; (iv) a existência de modelos computacionais prontos para resolução de problemas (e.g.: o Simplex).

Como apontado por Ros e Barros (2003), deve-se ressaltar que cada uma dessas técnicas pode ser resolvida de forma determinística ou estocástica, implícita ou explícita. A otimização determinística utiliza como variáveis de entrada, séries históricas, dados observados (as condições hidrológicas são perfeitamente conhecidas); a otimização estocástica implícita utiliza como variáveis de entrada séries geradas sinteticamente ou por métodos de previsão, ou seja, com base na série histórica; a otimização estocástica explícita utiliza na formulação da otimização procedimentos estocásticos aplicados à série histórica original como variável de entrada (a otimização é realizada considerando as incertezas associadas aos eventos).

Outras importantes revisões sobre a modelagem de otimização de sistemas de reservatórios estão no trabalho de Simonovic (1992) e no artigo de Wurbs (1993) que, ampliando o trabalho de Yeh (1985), produz nova atualização sobre modelos de análise de sistemas de recursos hídricos, com ênfase nas aplicações práticas de modelos de simulação, otimização e de rede de fluxo. Mais recentemente, o estado da arte sobre modelos para operação de sistemas de reservatórios está tratado no trabalho de Lima e Lanna (2005), com foco nos modelos baseados nas técnicas de simulação e otimização, e de modelos conjunto de simulação-otimização.

Labadie (2004) apresenta uma profunda revisão sobre modelos para operação ótima de sistemas de reservatórios, inclusive a inclusão dos mesmos em sistemas de suporte a decisão (SSD), discute as futuras direções da pesquisa e aplicações na área, descreve métodos de programação heurística (algoritmos genéticos, redes neurais e lógica fuzzy) e aponta possíveis razões para o fato de que, a despeito do avanço da pesquisa sobre a aplicação de modelos de otimização de sistemas de reservatórios, ainda há muitas disparidades impedindo que estes modelos não sejam implementados e praticados no “mundo real” da operação de reservatórios.

Wurbs (2005) apresenta outra revisão do estado da arte sobre modelos de otimização, contemplando uma amostra representativa de numerosos artigos e outras publicações sobre o desenvolvimento e aplicações de modelos de otimização em sistemas de recursos hídricos, baseados nas diversas técnicas como programação quadrática, dinâmica, programação linear e não-linear, pesquisa de gradiente, algoritmos genéticos, entre outras, ou a combinação de mais de um tipo de métodos de otimização.

3.4.1 - MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

A primeira aplicação da PL em problemas de operação determinística de reservatório foi feita em data anterior ao ano de 1962, sendo usada para um problema simplificado de um reservatório sem armazenamento extra-anual (Dorfman, 1962, apud Simonovic, 1992). A teoria da PL pode ser encontrada em textos de pesquisa operacional tais como Wagner (1970) e Luenberger (1973) e Braga Jr. (1987), como citados por Lima e Lanna (2005).

O Método Simplex e suas variações (e.g.: Simplex Revisado e Simplex Dual) têm sido os mais utilizados na solução de PL aplicada a sistemas de recursos hídricos. A explicação e aplicação dos Métodos Simplex podem ser encontradas em Braga Jr (1987), referenciando o

pacote computacional LINDO - “Linear Interactive and Discret Optimizer”, e em Labadie (1987), entre outros. Um pacote computacional que tem sido bastante utilizado, ultimamente, é o PCx, que resolve problemas de PL baseado no método do ponto interior (Hillier e Lieberman, 1985), e está disponível gratuitamente na Internet, segundo Czyzyk et al. (1997) apud Brandão (2004). Comparativamente ao Simplex, o PCx é um algoritmo de processamento mais rápido, o que vem encorajando sua aplicação.

Lima e Lanna (2005) referenciam algoritmos mais eficientes que o Simplex, como é o caso do método primal-dual utilizado no modelo HOPDM - “Higher Order Primal-Dual Method”, apresentado por Gondízio e Makowski (1995) para problemas de grande escala; e como o modelo GAMS - “General Algebraic Modeling System”, desenvolvido pelo Banco Mundial, que integra o sistema GAMS/MINUS - “Modular In-Core Nonlinear Optimization System”, com capacidade para resolução de problemas complexos tanto lineares como não-lineares, e o sistema GAMS/ZOMM - “Zero/One Optimization Model”, que pode ser usado para resolução de PL com inteiros.

Wurbs (1993) cita modelos baseados em PL como o HYDROSIM (Shane e Gilbert, 1982), usado para calcular os armazenamentos, descargas e geração de energia de um sistema de cinquenta e dois reservatórios do Tennessee Valley Authority (TVA); o MONITOR I desenvolvido pelo Texas Water Development Board e descrito por Martin (1987), aplicado para analisar sistema de reservatórios operado para a geração de energia, abastecimento humano e regularização, e o REZES, descrito por Simonovic (1992). Um modelo determinístico de PL foi apresentado e aplicado por Crawley e Dandy (1993), para planejamento e operação mensal do sistema de reservatórios que abastece a cidade de Adelaide, Austrália, visando a minimização dos custos de bombeamento sujeito à manutenção de níveis de armazenamento nas represas.

Curi e Curi (2001) desenvolveram e apresentaram o modelo CISDERGO - “Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater (Optimal) Operation”, que é um programa de otimização baseado em programação linear recursiva, destinado a maximizar múltiplos benefícios ou objetivos relativos ao uso da água de reservatório, poços e rios, em conjunção com o planejamento ou gerenciamento de perímetros irrigados. Estes mesmos autores apontam que a PL, bem como outras técnicas de programação matemática, foram, também, usadas no desenvolvimento de trabalhos para otimizar sistemas de produção agrícola, considerando cultivo único ou múltiplos, submetidos ou não a programas de irrigação específicos (e.g.: Van Deman et al., 1976; Trava et al., 1977; Matanga e Mariño, 1979; Kumar e Khepar, 1980; Autran, 1980; Neves et al., 1984; Tsai et al., 1987; Labadie,

1987; Bernardo et al., 1988; Arce, 1990; Mannocchi e Mecarelli, 1994; Dantas Neto, 1994; Oliveira e Lanna, 1997; Curi e Curi, 1998, Carvalho et al., 2000, e Rodrigues et al., 2000).

Interessantes aplicações do CISDERGO são apresentadas no artigo de Almeida et al. (2001), onde se busca otimizar a seleção de culturas de um perímetro irrigado, alimentado por um reservatório e poços amazonas, localizado no semi-árido do estado da Paraíba, visando maximizar a mão de obra e a receita líquida advinda da agricultura irrigada; e no trabalho de Albuquerque et al. (2003), onde se avalia o potencial de atendimento hídrico ótimo do reservatório Jataúba, localizado no Agreste semi-árido do estado de Pernambuco, para atender a irrigação de 10.000 ha, visando maximizar a receita líquida com a agricultura irrigada.

Uma aplicação comparando otimização determinística e estocástica é apresentada por Lund e Ferreira (1996). Lima e Lanna (2005) apontam outras importantes aplicações de PL determinística que demonstram a utilidade desta técnica (e.g.: Windsor, 1973; Martin, 1983; Grygier e Stedinger, 1985; Ellis e ReVelle, 1988; Trezos, 1991; além de Yeh, 1985 e Wurbs, 1993,1996).

Houck e Cohon (1978) desenvolvem o modelo SESLP - "Sequential Explicitly Stochastic Linear Programming Model", para a operação de sistemas de múltiplos reservatórios e múltiplos usos, tanto para planejamento e operação, utilizando um algoritmo denominado "Scorpio" para diminuir o esforço computacional e a grande quantidade de dados necessária ao uso do modelo. Loucks et al. (1981) apresentam algumas formulações da PL estocástica para sistemas de recursos hídricos. A metodologia é aplicada a um sistema de seis reservatórios no rio Missouri (EUA) e os resultados consideram os aspectos da aplicabilidade e das limitações na utilização da otimização determinística para sistemas de grande porte.

Yeh (1985) apresenta uma extensa lista de aplicações de modelos estocásticos de PL em gerenciamento e operação de reservatórios. Wurbs (1996) apud Lima e Lanna (2005) cita algumas aplicações da PL estocástica. Outras importantes referências de aplicações da PL estocástica em sistemas de reservatórios estão apresentadas nos trabalhos de Labadie (2004) e Lima e Lanna (2005).

3.4.2 - MODELOS DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Próxima à popularidade da PL, a programação dinâmica (PD) tem sido uma técnica de otimização muito aplicada a problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, no geral, e à operação de reservatórios, no particular (Yakowitz, 1982 apud Labadie, 2004). A estrutura de um problema de PD é formada de função-objetivo, função de

transformação (mudança) de estado, equações de restrição e funções recursivas, sendo que a sua solução sugere a adoção da seguinte linha de raciocínio (Barros, 1997):

- (i) divide-se o problema geral em estágios;
- (ii) determina-se o ótimo em cada estágio;
- (iii) relaciona-se o ótimo de um estágio a outro, através de uma função recursiva;
- (iv) completa-se todos os estágios, obtendo-se o ótimo global.

A grande desvantagem dos modelos de PD é a dimensionalidade dos problemas. Loucks et al. (1981) apontam que a dimensão de um problema de PD cresce linearmente com o número de estágios, mas exponencialmente com o número de variáveis de estado. Este problema ficou conhecido como a “maldição” da dimensionalidade. Votruba (1988) mostra por meio de exemplificação, só ser possível, pelas técnicas convencionais de PD, a solução de sistemas de recursos hídricos com no máximo quatro reservatórios.

A teoria da PD pode ser encontrada em textos da autoria de Bellman e Dreyfus (1962), Nemhauser (1966), Wagner (1969) e Dreyfus e Law (1977). Lima e Lanna (2005) referenciam que aplicações de modelos de PD em sistemas de recursos hídricos podem ser encontradas em Loucks et al. (1981), Yakowitz (1982), Goldman (1984), Yeh (1985), Labadie (1987) e Wurbs (1996). Outras aplicações de PD a problemas de operação de reservatórios estão relatadas no trabalho de Simonovic (1992).

Chung e Helweg (1985), apud Wurbs (1993), usaram um modelo de PD combinado ao modelo de simulação HEC-3 para definir políticas de operação para o lago Oroville e o reservatório San Luis, componentes do “Califórnia State Water Project”, visando maximizar o benefício líquido da exportação de excessos hídricos do sistema. Perera e Codner (1996) apresentam um modelo de programação dinâmica estocástica (PDE) visando determinar regras de operação baseadas em níveis-meta para um sistema de quatro reservatórios usados no abastecimento urbano da cidade de Melbourne, Austrália.

Labadie (2004), apresenta ampla revisão sobre modelos de PD (PD convencional ou discreta; PD diferencial discreta; PD determinística; PD estocástica) e suas aplicações em sistemas de reservatórios, referenciando, entre outros, o pacote computacional CSUDP (Labadie, 1997). Lima e Lanna (2005) apresentam diversos algoritmos de PD e suas aplicações em sistemas de recursos hídricos, dando ênfase aos problemas de operação de reservatórios.

3.4.3 - MODELOS DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

A Programação Não-Linear (PNL) não goza da popularidade que a PL e a PD têm na análise de sistemas de recursos hídricos. Segundo Yeh (1985), isto decorre em razão de que as resoluções computacionais de modelos de PNL, se comparadas com as de modelos de PL e PD, são lentas e exigem grande capacidade de armazenamento de dados. Segundo Labadie (2004), muitos dos problemas de otimização de sistemas de reservatórios não podem ser modelados, realisticamente, usando-se o artifício da linearização, devendo ser tratados como problemas de programação não linear, particularmente se há inclusão da geração de energia hidrelétrica na função objetivo e/ou restrições. A PNL, em que pese não permitir a incorporação da natureza estocástica das variáveis hidrológicas, possibilita uma formulação mais genérica, permitindo analisar sistemas de recursos hídricos com funções-objetivo não-separáveis e restrições não-lineares, o que não é possível com outras técnicas de otimização (Lima e Lanna, 2005).

Conforme Cirilo (1997), a PNL pode ser classificada quanto aos métodos utilizados na solução dos problemas em: (i) técnicas analíticas - as soluções ótimas são obtidas pela resolução de sistemas de equações, com apoio de derivadas, podendo a otimização ser reduzida à procura das raízes desses sistemas, e (ii) técnicas de busca numérica - usam informações passadas em um processo iterativo, para gerar melhores soluções no processo de otimização, e permitem ainda o emprego de métodos numéricos para resolver problemas dos quais não se conhece solução analítica.

Segundo Labadie (2004), os algoritmos de PNL geralmente considerados como os mais poderosos e robustos são: (i) a programação quadrática sucessiva (SQP), ou método Lagrangeano projetado; (ii) a programação linear sucessiva, ou seqüencial (SLP); (iii) o método Lagrangeano aumentado, ou método dos multiplicadores (MOM), e (iv) o método do gradiente reduzido generalizado (GRG). No estudo de Cirilo (1997), estão citados alguns programas computacionais disponíveis para a resolução de problemas de PNL, como o ADS da Universidade da Califórnia; o GAMS, da GAMS Development Corporation; o LANCELOT, e o SOLVER da planilha Excel, entre outros. Gregory e Fourer (2005), do Optimization Technology Center/Argonne National Laboratory (USA), mantêm na Internet uma lista de questões mais freqüentes sobre PNL, intitulada "Nonlinear Programming-Frequently Asked Questions", onde estão disponibilizados programas, trabalhos e publicações afins.

Com o desenvolvimento crescente das tecnologias computacionais, análises de grandes sistemas de recursos hídricos pelo uso de algoritmos de PNL vêm se tornando possíveis, motivo pelo qual tem havido um maior número de pesquisas apoiadas na aplicação prática das técnicas de PNL. Curi et al. (1997) usaram PNL para estudar a alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arcoverde, localizado na Zona Sertão do estado da Paraíba, para fins de irrigação. Tejada-Guibert et al. (1990) apresentam uma importante aplicação do pacote computacional MINOS (Murtagh e Saunders, 1987) para otimizar a operação de cinco reservatórios do Califórnia Central Valley Project, visando maximizar o valor econômico da energia elétrica gerada a cada mês.

Peng e Buras (2000) apresentam outra aplicação do MINOS na otimização de reservatórios na parte alta do rio West Branch Penobscot, no estado do Maine (USA). Ros e Barros (2003) empregaram o modelo de otimização SISOPT (Barros, 2003), com opção de solução por PNL, com o objetivo de otimizar a operação de oito reservatórios, para fins hidroenergéticos, os quais formam o Sistema Paranapanema, localizado no sul do Estado de São Paulo, situado na Bacia do rio Paraná. Curi e Curi (2001) desenvolvem e apresentam o modelo ORNAP - Optimal Reservoir Network Analysis Program, que é um programa de otimização baseado em técnicas de PNL, destinado a maximizar múltiplos benefícios ou objetivos relativos aos múltiplos usos da água (abastecimento humano, piscicultura, atividades agro-pecuárias e industriais, controle de enchentes, prevenção contra secas, geração de energia, etc.) de sistemas de reservatórios, com vistas a dar subsídios ao planejamento ou gerenciamento do uso de bacias hidrográficas.

O ORNAP, que vem sendo gradativamente aprimorado, foi projetado tendo como base a teoria de sistemas físicos (Kesavan, 1987, Vlack e Singal, 1983, apud Curi e Curi, 2001) onde as informações físicas de cada elemento do sistema dizem respeito a: reservatórios, tomadas de água, descargas de fundo, vertedores, elementos de ligações (como, por exemplo, calhas de rios, canais, etc.), geradores de energia, piscicultura, bombas, demandas fixas, fontes, perímetros irrigados e elemento terminal (as tomadas d'água, vertedores, descargas de fundo, piscicultura e geradores de energia estão, necessariamente, ligados, a montante, a um reservatório do sistema). O modelo ORNAP, nos últimos anos, vem sendo empregado com sucesso em planejamento de sistemas de recursos hídricos, incluindo a operação de reservatórios, com vistas, entre outros, ao uso da água para a irrigação. Várias aplicações deste modelo podem ser vistas, entre outros, nos trabalhos de Andrade et al. (2001); Barbosa et al. (2001); Andrade et al. (2002a, 2002b, 2002c); Albuquerque et al. (2003); Melo, et al., (2004), Silva et al. (2004), Celeste et al. (2004) e Lima (2004).

Importantes contribuições sobre modelos de PNL e suas aplicações em sistemas de reservatórios estão apresentadas nos trabalhos de Yeh (1985), Simonovic (1992), Wurbs (1993), Labadie (2004) e Lima e Lanna (2005).

3.5 - MODELOS CONJUNTOS DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

Na análise de sistemas de recursos hídricos, como já apontado por Yeh (1985), observa-se a tendência de incorporar esquemas de otimização em modelos de simulação, obtendo-se um certo grau de otimização. Karamouz e Houck (1987) apud Lima e Lanna (2005) apresentaram um algoritmo que usa em conjunto um modelo determinístico de PD, análises de regressão e um modelo de simulação na determinação de regras operacionais para reservatórios, começando o ciclo com a otimização da operação do reservatório para definir regras operacionais, as quais são testadas por um modelo de simulação, utilizando um conjunto de dados de vazão diferente do utilizado na otimização. De acordo com Wurbs (1993), várias estratégias têm sido empregadas para a utilização conjunta de modelos de simulação e otimização, como por exemplo: o modelo pode preliminarmente definir através de um algoritmo de otimização algumas alternativas, que serão, posteriormente, detalhadas e testadas por um algoritmo de simulação.

Oliveira e Lanna (1997) utilizaram o modelo de PL denominado HOPDM, aqui já citado, para, em conjunto com modelo de simulação SIBAC, estudar o desenvolvimento de regras operacionais de um sistema composto por cinco reservatórios, para abastecimento e irrigação, localizados na bacia do rio Acaraú, no estado do Ceará. Diversas possibilidades de combinação de modelos de simulação e otimização podem ser realizadas, variando-se tanto as características da simulação (intervalo de simulação, tipo de balanço) e da otimização (tipo, nível de simplificação), como o esquema de inter-relacionamento destas técnicas. A Figura 3.5 apresenta um esquema básico que pode ser utilizado na combinação de modelos de simulação e otimização.

Segundo Porto e Azevedo (1997), quanto ao uso de modelos que incorporam o uso conjunto de simulação e otimização na análise de sistemas de reservatórios, constata-se que grande parte das aplicações tem utilizado um tipo de modelo conhecido por “modelos de rede de fluxo”, que misturam características dos modelos de simulação e otimização e podem incorporar as características estocásticas das vazões de entrada.

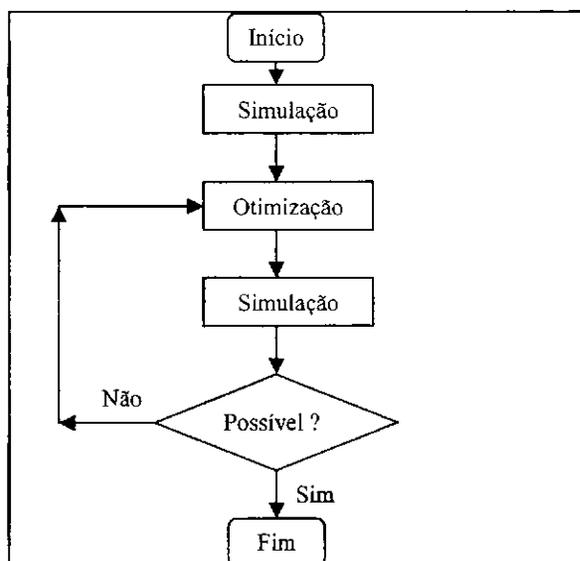


Figura 3.5 – Esquema seqüencial de simulação-otimização (Fonte: Lima e Lanna, 2005)

3.5.1 - MODELOS DE REDE DE FLUXO

Um pouco antes dos anos 1960, a teoria de redes de fluxo ganhou corpo e passou a se destacar como uma poderosa ferramenta de análise para muitos problemas de gerenciamento e de pesquisa operacional. Elmaghraby (1970) referencia como excelentes pontos de partida para o estudo desta teoria os livros de Ford e Fulkerson (1962) e Hu (1967). A partir dos anos 1970, a literatura mostra que os modelos de rede de fluxo (MRF) passaram a ser usados, mais freqüentemente, na representação e análise de problemas relacionados a recursos hídricos, como citado no trabalho de Graham et al. (1986).

Os MRF apresentam algumas desvantagens que restringem a representatividade do sistema em estudo, como só permitir apenas custos lineares e apenas dois tipos de limitações do sistema: (i) limitações de balanço de massa linear em cada nó; (ii) limites, máximo e mínimo, para a vazão em cada arco. Os MRF formam, regra geral, uma classe de modelos de simulação que contam com um algoritmo de otimização, a exemplo do método “Out-of-kilter”, um algoritmo primal-dual de programação linear desenvolvido por Fulkerson (1961), voltado à solução de problemas de minimização de custos em redes de fluxo completamente circulantes.

Matematicamente, o algoritmo Out-of-Kilter trata o problema de otimização como uma representação típica de uma aplicação de Programação Linear, cuja formulação pode ser expressa como a seguir (Castro e Porto, 2003):

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} * Q_{ij} \quad (3)$$

onde:

Q_{ij} – é a vazão média entre o nó i e o nó j durante o intervalo de tempo considerado,

C_{ij} – é custo (ou prioridade) associado ao transporte de uma unidade de fluxo através do arco i,j do nó i para o nó j .

Sujeito a:

a) satisfação do equilíbrio de massa em todos os nós $j = 1, 2, \dots, N$.

$$\sum_{i \in I_j} Q_{ij} - \sum_{k \in O_j} Q_{j,k} = 0 \quad (4)$$

onde:

I_j – é o conjunto de todos os nós com arcos que terminam no nó j ,

O_j – é o conjunto de todos os nós com arcos que se originam no nó j .

b) a vazão mínima em todos os arcos (i, j)

$$Q_{ij} \geq I_{ij} \quad (5)$$

para todos os arcos (i, j) , onde I_{ij} é vazão mínima no arco (i, j)

c) a vazão máxima em todos os arcos (i, j)

$$Q_{ij} \leq U_{ij} \quad (6)$$

para todos os arcos (i, j) , onde U_{ij} é a vazão máxima no arco (i, j)

Wurbs (1993) referencia vários modelos de rede de fluxo e suas aplicações à análise de sistemas de reservatórios, e bacias hidrográficas, como: o SIMYLD II, desenvolvido originalmente pela Texas Water Development Board (Labadie 1972); o AL-V e o SIM-V, usados na simulação e otimização da operação de um sistema de reservatórios, usinas hidrelétricas, canais, adutoras e rios, interconectados (Martin, 1983); as várias versões do modelo MODSIM que foram desenvolvidas pela Colorado State University, baseadas originalmente na modificação do modelo SIMYLD II (Labadie et al., 1984); o WASP, descrito por Kuczera e Diment (1988); uma nova versão do DWRSIM, desenvolvidos pelo State Department of Water Resources, usado pelo State Water Project para aplicação no Central Valley Project (Chung et al., 1989), e o HEC-PRM (Burnham e Davis, 1992).

No caso particular do MODSIM, Castro e Porto (2003) referenciam ser ele um modelo de simulação do tipo redes de fluxo pura, com algoritmo de otimização, que foi desenvolvido

sob a liderança do Professor John Labadie (Labadie, 1988; Azevedo, Porto e Zahed Filho, 1997). Apresenta-se adequado à análise de sistemas complexos de aproveitamento de recursos hídricos, tendo sido utilizado em diversos estudos (Shafer et al., 1981; Gragam et al., 1986; Labadie, 1988; Azevedo et al., 1998).

A partir de 1998, o Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (LabSid) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Universidade de São Paulo (USP), passou a desenvolver interfaces gráficas para facilitar a aplicação do MODSIM, surgindo a chamada versão ModSimP32 (Roberto e Porto, 1999b), desdobrada posteriormente nos modelos ModSimLS e AcquaNet (2002), essa última, mais recente, desenvolvida para diferenciar da versão original. A versão AcquaNet é um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas que permite montar redes com um grande número de reservatórios, demandas e trechos de canais.

No Brasil, aplicações do MODSIM, seja na versão ModSimP32 ou na versão Acquanet, podem ser referidas, entre outras, ao Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (Souza Filho e Porto, 1996); ao sistema da bacia dos rios Itapicurú (Porto et al, 1997 e Porto, 1999) e Jacuípe (Porto 1997), na Bahia; ao sistema Cantareira, em São Paulo (Azevedo, 1998), ao sistema Coremas-Mãe D'Água, na bacia do rio Piancó, no estado da Paraíba (Lima, 2004); ao Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (Castro e Porto, 2003), às bacias dos rios Itapicuru e Paraguaçu, na Bahia (Porto, et al., 2004).

Cheng e Hsu (2002) apresentam uma aplicação do modelo EMNET (McBride, 1985), em rede de fluxo generalizada para análise de demandas versus oferta, de longo termo, para planejamento de reservatórios na bacia do rio Tanshui, em Taiwan. Citam estes mesmos autores que muitos pesquisadores usam modelos de rede de fluxo (com base no algoritmo out-of-kilter) para resolver problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, como: o ACRES (Sigvaldason, 1976); o MODSIM3 (Labadie et al. 1986); o CRAM (Brendecke et al. 1989), o DWRSIM (Chung et al. 1989) e KCOM (Andrews et al. 1992).

Lima et al. (2003) utilizaram o modelo matemático MIKE BASIN 2000, com capacidade de associar técnicas de simulação (intervalos diários) e otimização através de uma rede de fluxo, para um estudo de caso, para a bacia do rio Atibaia no estado de São Paulo, com ênfase na transferência de água dos dois reservatórios do Sistema Cantareira localizados na bacia, considerando os usos múltiplos da água. O modelo, segundo estes mesmos autores, tem sido utilizado em várias pesquisas, entre as quais merecem destaque: Storm (1999), que aplicou o modelo na bacia do rio Cape Fear na Carolina do Norte (EUA); Dyrbak (2000), que utilizou o modelo em um estudo para otimizar as regras de operação de um sistema de

reservatórios na Polônia; além de outras aplicações descritas por Macdonald (1998), Ammentorp (1999), Larsen et. al. (2000) e Jensen et. al. (2000).

Labadie (2004) referencia além do MODSIM, incorporado a sistema de apoio a decisão (Labadie, et al., 2000), os modelos de rede de fluxo CALSIM II, substituto do DWRSIM e PROSIM, e o OASIS (semelhante ao CALSIM). Wurbs (2005) cita diversos trabalhos com aplicações de modelos baseados em rede de fluxo, como o SIMYLD-II, o AL-V, o SIM-V, o MONITOR-I, o DWRSIM, o CRAM e o MODSIM.

3.6 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A IRRIGAÇÃO E SOBRE A PRÁTICA DA PSICICULTURA EM RESERVATÓRIOS

Na concepção do estudo, como já foi comentado, procura-se otimizar o uso da água dos reservatórios para favorecer o desenvolvimento de atividades rurais como a irrigação e a piscicultura. Algumas considerações sobre a irrigação e piscicultura, entre outros usos, que serão complementadas à medida do avanço do trabalho, estão apresentadas a seguir.

3.6.1 - IRRIGAÇÃO

A irrigação é uma prática agrícola de fornecimento de água às culturas, onde e quando as dotações pluviométricas, ou qualquer outra forma natural de abastecimento, não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas (Gomes, 1999). Segundo Curi et al., (2000), as atividades de irrigação podem causar impactos no meio antrópico, abiótico e biótico, que precisam ser levados em consideração, como a seguir se comenta:

(i) Meio Antrópico

a) Aspectos sociais, culturais e psicológicos:

- Organização social: a irrigação proporcionará uma maior tranquilidade ao homem do campo, visto que a preocupação com a seca e conseqüente perda das culturas diminui consideravelmente; com a melhoria das condições econômicas trazidas pela irrigação, as comunidades poderão formar cooperativas/empresas deixando-as mais atuantes na sociedade.
- Impacto cultural: está relacionado com a melhoria das condições econômicas que pode contribuir para um aumento do nível cultural das comunidades rurais;
- Alimentação: a irrigação proporciona uma maior diversidade e qualidade de produtos alimentares;

- Saúde: há evidências que muitos processos de irrigação geram efeitos adversos à saúde pública, como a proliferação de vetores de enfermidades transmissíveis, em regiões nas quais existem doenças como malária, filariose, encefalites, esquistossomose, etc.; a contaminação do irrigante por substâncias tóxicas, contaminação da comunidade próxima à área irrigada e contaminação do usuário dos produtos irrigados;

b) Desenvolvimento

- Emprego/ renda: haverá aumento da demanda da mão de obra, o que fixará o homem no meio rural, podendo ocasionar um conseqüente aumento na renda local;
- Desenvolvimento local: com a irrigação, provavelmente, haverá aumento da renda, novos equipamentos serão necessários, conseqüentemente, novos bens serão consumidos, ou seja, haverá um desenvolvimento local para atender as novas necessidades geradas;
- Desenvolvimento regional: depende da quantidade e qualidade das culturas, além do nível de organização dos produtores podendo haver até exportação das culturas.

(ii) Meio Abiótico

a) Terrestre:

- Ecomorfologia: o aumento das áreas cultivadas implica em desmatamentos;
- Erosão: a irrigação tende a agravar problemas da erosão do solo devido ao desmatamento e uso de equipamentos pesados que compactam o solo facilitando a erosão através da diminuição das taxas de infiltração;
- Efeitos no solo: existe a possibilidade de mudanças nas características do solo, tais como salinização, desertificação, elevação do lençol freático, mudança de suas características devido a produtos químicos, etc..

b) Aquático:

- Qualidade: um efeito colateral da irrigação é a contaminação de córregos, rios, reservatórios e da água subterrânea por sais solúveis, fertilizantes, resíduos de defensivos e herbicidas, elementos tóxicos, sedimentos, etc.;
- Assoreamento: a possibilidade de assoreamento dos corpos d'água se dá em associação com o processo de erosão e transporte de sedimentos, sendo que neste caso o assoreamento será influenciado pela presença de maior ou menor cobertura vegetal.

c) Atmosférico:

- Microclima: a irrigação pode ocasionar alterações no regime hidrológico, visto que pode estabelecer alterações da temperatura, do vapor da água na atmosfera, da precipitação local, da evaporação e da evapotranspiração;

- Ruídos: seja devido à implantação de alguma indústria, em função do aproveitamento da produção agrícola e em função do transporte, ou pela necessidade de transportar as culturas, por motivo de exportação;
- Poeira: em função do transporte da produção agrícola e do tratamento mecânico da terra como, por exemplo, sistematização, aração, gradagem, etc..

(iii) Meio Biótico:

a) Flora:

- Flora natural: com a irrigação, mais áreas serão desmatadas para plantio de novas culturas ocasionando uma transformação do ecossistema natural, trazendo sérios problemas de adaptação para as espécies ali existentes;
- Aquática: com a possível construção de reservatórios, a água passará de corrente para parada, podendo causar problemas de adaptação a algumas espécies de plantas aquáticas; na área do lago, é indispensável uma avaliação criteriosa da biomassa inundada sem o que não será possível estimar o grau de eutrofização e aquilatar, qualitativamente, a água destinada à irrigação.
- Antrópica: ocorrerá mudança de ambiente na orla do lago e dos canais de drenagem, sendo que a erosão e o deslizamento nas encostas são também impactos sérios.

b) Fauna:

- Terrestre: poderá haver desmatamento, para implantação de novas culturas, implicando em destruição e redução do habitat de algumas espécies, bem como mortes eventuais dessas espécies;
- Alada: com relação à fauna alada silvestre, poderá representar um impacto negativo a necessidade de migração temporária;
- Aquática: algumas espécies da ictiofauna (fauna de peixes) poderão apresentar dificuldade de reprodução, pela mudança de regime do manancial a jusante da barragem e a vazão regularizada poderá intensificar a pesca predatória.

É sabido que existem diferentes métodos de irrigação. Segundo Gomes (1999), os métodos de irrigação, em função da forma de aplicação de água às plantas, podem ser divididos em duas categorias principais: a irrigação por superfície, conhecida também como irrigação por gravidade (por sulcos, por tabuleiros, por faixas com declive, por inundação, etc.), e a irrigação sob pressão, ou pressurizada (por aspersão, por gotejamento, por microaspersão). Outros métodos mais simples de irrigação podem ser citados: xique-xique, potes de barro e cápsulas porosas. Cada um destes métodos, entretanto, apresenta

características próprias de aplicação da água, diferentes eficiências na sua distribuição, custos, vantagens, desvantagens.

Os sistemas de irrigação têm o potencial de aplicar a água aos cultivos com eficiência de até 70% a 85% (Merriam e Keller, 1978; Willardson, 1978). Alguns sistemas de irrigação incorporados de equipamentos automatizados têm favorecido eficiência em torno de 90% (Fishback e Somerhalder, 1971). Segundo Doorenbos e Pruitt (1997), a eficiência global de um projeto, E_p , de irrigação consiste na consideração das diversas fases de condução e aplicação da água no campo, ou seja, a eficiência de condução no canal principal, E_c ; a eficiência de condução dos canais, E_b , e a eficiência de aplicação de água, E_a . O produto destes três fatores resulta na eficiência total do projeto ($E_p = E_c.E_b.E_a$). Os mesmos autores apresentam valores de eficiências médias de condução, E_c , distribuição, E_f (este sendo produto da eficiência dos canais), e de eficiência global, E_p , de um projeto de irrigação, para diferentes métodos de abastecimento de água (exemplo geral: abastecimento à demanda, alimentado por um sistema de tubos sob pressão - irrigação por aspersão: $E_f = 0,70$; $E_c = 0,73$; $E_p = 0,51$).

Valores médios de eficiência dos métodos de irrigação na aplicação de água estão referidos por Telles (1999), condicionados a outros fatores, como por exemplo: i) Sulcos de infiltração (condicionante: sulcos longos e/ou solos arenosos): eficiência média de 0,45; ii) Inundação em tabuleiros (solo argiloso/lençol superficial): eficiência média de 0,60; iii) Tubos perfurados (em condições favoráveis): eficiência média de 0,80; iv) Pivô central (vento leves/condições favoráveis): eficiência média de 0,85; v) Gotejamento (em condições razoáveis): eficiência média de 0,85; vi) Aspersão convencional (com ventos leves ou sem vento): eficiência média de 0,75; vii) Microaspersão (em condições favoráveis): eficiência média de 0,90.

Não sendo propósito deste estudo um aprofundamento sobre as peculiaridades de sistemas de irrigação, vale comentar que o uso de equipamentos de baixa eficiência pode contribuir para o aumento da escassez de disponibilidade de água no meio rural, bem como favorecer a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, tornando-as impróprias ao consumo humano e animal. Estudos da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), como referidos por Cordeiro (1997), estimam que dos 250 milhões de hectares irrigadas no mundo 50% apresentam problemas de salinização e saturação do solo, resultando em 10 milhões de hectares que estão, anualmente, tornando-se imprestáveis à agricultura. Este mesmo autor cita que os projetos públicos de irrigação no Nordeste do Brasil estão com cerca de 30% de sua área irrigada salinizada, onde parte dessa área já se tornou improdutivo.

No Nordeste do Brasil, onde a maioria dos sistemas de irrigação em operação não foi implementada com base em um projeto adequado, segundo Telles (1999), o uso perdulário da água na agricultura se agrava em razão de que não é ainda feita, de forma ampla, a cobrança pela utilização de recursos hídricos. Para regiões com deficiências hídricas, como é o caso do Nordeste, o combate às causas de desperdício, a utilização de métodos de menor consumo e de inovações tecnológicas, associadas à cobrança pela utilização da água, permitirão a racionalização do seu uso na agricultura e reduções consideráveis em seu consumo. Mesmo assim, diz o autor aqui citado, caso a implementação das políticas do uso da água sejam bem sucedidas, como preconizadas pela Lei No. 9433, de 08/01/1997, até o ano de 2010 não se deve esperar que em nível nacional, na agricultura irrigada, haja reduções superiores a 5% nas demandas de água.

Uma produção eficiente e rentável deve constituir o principal objetivo econômico de um empreendimento agrícola, com utilização racional dos recursos disponíveis, a fim de se obterem os mais altos níveis de produtividade econômica. Na atividade de irrigação, a água é o recurso natural sobre o qual se tem maior interesse em exercer controle, no sentido de alterar seu padrão de disponibilidade espacial e temporal, adequando-o à demanda agrícola (Frizzone, 1993). Esta afirmação faz pensar na necessidade de se definir medidas de performance de irrigação, a partir do ponto de vista hidrológico. Neste sentido, a American Society of Civil Engineers (ASCE) tem realizado estudos de avaliação da performance atual de sistemas de irrigação a partir de uma boa precisão do balanço hidrológico sobre a área considerada, em que os usos da água são classificados como usos consuntivo ou não consuntivo, e benéfico ou não benéfico (Clemmens e Burt, 1997).

Segundo estes últimos autores, a performance real é baseada nos usos da água sobre um período de tempo especificado, em lugar da observação de um evento de irrigação singular (com potencial associado, porém não ainda atual, usos consuntivo e/ou benéfico). A extensão superficial do sistema pode está em qualquer escala (por exemplo: campo, fazenda, distrito, ou projeto), dependendo dos propósitos da avaliação, e a extensão vertical pode incluir apenas a zona radicular da cultura, ou pode também incluir apenas o lençol freático ou até o aquífero subterrâneo, dependendo do interesse ou das condições hidrológicas. Os indicadores de performance de irrigação são definidos em termos da última destinação (isto é, o uso) da água de irrigação aplicada.

Um planejamento que busca ajustar padrões de cultivo à disponibilidade de água pode melhorar o rendimento sócio-econômico-ambiental dos perímetros irrigados. Este planejamento, usualmente, pode se valer da utilização de técnicas de otimização (via técnicas

de programação linear, não-linear e dinâmica) visando, em geral, maximizar a receita líquida advinda da produção agrícola irrigada. O melhoramento da eficiência do uso da água nos perímetros irrigados requer, normalmente, que os seguintes fatores sejam satisfeitos:

- minimização da degradação do solo através de processos de rotação de culturas, preparo do solo e lay-out do sistema de drenagem apropriados (e.g.: Booler et al, 1996, Melo e Braga Jr., 1996);
- adaptação da água disponível às necessidades das culturas a serem plantadas e, cuja escolha, venham a maximizar os benefícios econômicos - inclusive com plantações na entressafra (Frizzone, 1995; Dantas Neto et al., 1996; Curi et al, 1997, Andrade, 2002);
- minimização do custo operacional e de instalação do sistema de irrigação - escolha das tubulações e estações de bombeamento, localização dos pontos de tomada d'água, etc. (ex: Curi e Gomes, 1996);
- escolha de tipo de irrigação (aspersão, gotejamento e de superfície) que se adapte melhor as condições do terreno, disponibilidade de água e tipo e lay-out das culturas, minimizando os gastos com o sistema,
- escolha do tipo de plantações a serem utilizadas no perímetro irrigado visando maior lucro (Frizzone e Saad, 1996; Curi et al., 1997; Barbosa, et al., 2001).

As restrições, geralmente, são dadas por limitações físicas (operacional, geométrica, e hidráulica), como por exemplo:

- disponibilidade de água e área de plantio;
- qualidade da água, pressões e vazões mínimas;
- tipo de terreno para plantio;
- limitações quanto à capacidade das tubulações, estações de bombeamento e geradores de energia elétrica, limitações de ordem política e social (conflitos pelo uso da água, etc.),
- quantidade de água máxima e mínima suportada pelas plantações, etc..

3.6.2 - PISCICULTURA

Os peixes são excelentes conversores de alimentos e fornecem proteína da melhor qualidade, podendo satisfazer em parte as necessidades de alimentação das pessoas. Segundo Molle e Cadier (1992), a piscicultura é uma atividade que requer que a água tenha um certo padrão de qualidade (temperatura entre 22°C e 30°C, transparência entre 20 e 40 cm, pH entre 6 e 8,5 e condutividade de 100-500 micromhos, podendo atingir, em alguns casos, até 7.000 micromhos, além de outros elementos químicos como potássio, fosfatos, nitratos, etc., e um

certo equilíbrio ecológico em termos de bactérias, microalgas, plâncton animal, animais bentônicos, rãs, etc.). As atividades de piscicultura podem ser desenvolvidas, de preferência, em reservatórios de pequeno e médio porte, podendo ser referidas, entre outras, as seguintes vantagens:

- valorização dos açudes de água salgada;
- produção entre 50 a 100 Kg/ha na pesca tradicional, 200 a 500 Kg/ha numa piscicultura extensiva e de 1.000 a 5.000 Kg/ha para piscicultura semi-intensiva;
- transformação de subprodutos da agricultura e pecuária em carne de alto valor protéico;
- não interferir em muitos outros usos da água, já que tem um caráter pouco consuntivo;
- obtenção, nos cultivos intensivos, de grande produção em pequenas áreas,
- baixo custo de produção, quando comparada a outras atividades agropecuárias.

Numa piscicultura semi-intensiva (que exige peixamento + adubação da água e alimentação dos peixes + despesca), pode-se trabalhar no regime de agropecuária consorciada (uso de esterco de frangos, patos, suínos, bovinos e feixes de grama seca) além do desenvolvimento consorciado dentro do próprio açude (escolha apropriada e produtiva de espécies de peixes, animais e vegetais aquáticos), etc. A prática da piscicultura pode ter vários objetivos, como:

- comercial: quando os esforços são dirigidos para obtenção de lucros;
- social: quando a produção visa a alimentação, sem fins lucrativos;
- sanitário: quando o objetivo é eliminar insetos, vegetação daninha, poluição, etc.,
- recreativo: pesca esportiva.

Segundo estudos do DNOCS, citados por Albuquerque et al. (2003), alguns cuidados para a implantação da piscicultura em lagos devem ser observados:

- em reservatórios destinados ao abastecimento de água das populações, não pode ser praticada uma piscicultura racional do ponto de vista econômico, ou seja, voltada para uma produção máxima, porque esta só é conseguida com alto grau de eutrofização das águas, que é prejudicial à sua potabilidade;
- a piscicultura deve ter um caráter extensivo, devendo ser praticada sem adicionamento de alimentos orgânicos nem de sais minerais, ou seja, a produção deverá ser equilibrada

naturalmente com a quantidade de plânctons que se desenvolvem proporcionalmente às concentrações de sais minerais existentes nos lagos;

- as espécies de peixes a serem introduzidas e a sua população mantida no reservatório terão que ser cuidadosamente avaliadas em função do alimento disponível e de outros fatores ecológicos, podendo ser necessário despescas periódicas, a fim de remover o excesso da população existente,
- a pesca terá que ser controlada, para que não seja superior à produtividade, a não ser que os peixes sejam repostos, sistematicamente, pela administração do açude.

3.6.3 - OUTRAS CONSIDERAÇÕES

A qualidade de água dos reservatórios é o fator preponderante na alocação desta para os seus vários usos. Efeitos colaterais advindos da irrigação como a contaminação de rios, córregos e da água subterrânea por sais solúveis, fertilizantes, resíduos de defensivos e herbicidas, elementos tóxicos, sedimentos, etc., além da erosão na bacia hidrográfica e do assoreamento, podem resultar no comprometimento da qualidade de ambientes aquáticos como os reservatórios.

Além de cumprir importante função hidrológica, a exemplo da regularização de vazões, os reservatórios podem ser destinados a usos de várias naturezas, como: i) Recreação - possibilitando atividades náuticas, pesca, natação e outros esportes aquáticos (embora que esses benefícios sejam, geralmente, casuais, decorrentes de outras funções do reservatório); ii) Manutenção de ambientes propícios às atividades humanas (abastecimento, geração de energia, navegação, usos diversos na área de entorno das represas, etc.); iii) Conservação da fauna e flora; iv) Manutenção e preservação da harmonia paisagística, favorecendo o lazer contemplativo. A poluição possível de ser gerada a partir da agricultura irrigada, por atividades recreativas e de piscicultura (semi-intensiva ou intensiva), agravada pela poluição de origem urbana e industrial, pode degradar a qualidade da água e ter efeitos críticos nos reservatórios, impondo mudanças, na escala temporal e espacial, dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nestes ecossistemas aquáticos.

Segundo Tundisi et al. (1999), muitos rios e reservatórios encontram-se com a qualidade de água comprometida, razão dos anos que serviram como meio de descarga e transporte dos efluentes antropogênicos. O resultado das inúmeras descargas de água contaminada, poluída, com alta concentração de nutrientes (principalmente Nitrogênio e Fósforo), é um processo acelerado de eutrofização da água. Em resposta ao enriquecimento de nutrientes, há um aumento na concentração de fitoplâncton, com predominância de Cianofíceas (microrganismos

também conhecidos como cianoprocaríotes, ou algas azuis) e macrófitas aquáticas, o que promove um aumento de doenças de veiculação hídrica.

As florações de cianobactérias causam impacto social, econômico e ambiental, não apenas por sua biomassa contribuir para problemas estéticos como as “natas” verdes na superfície e o odor desagradável, mas, também, por alterar o sabor da água, aumentando os custos para o seu tratamento. A decomposição das florações de algas promove uma desoxigenação, alterando a química da água, concorrendo para o aumento das bactérias patogênicas (de vida livre ou agregadas ao material em suspensão), o que pode afetar a capacidade de sobrevivência de muitos animais aquáticos, inclusive do homem, comprometendo a disponibilidade hídrica para os usos mais nobres como abastecimento público, dessedentação animal, recreação de contato primário e irrigação de hortaliças (Carmichael, 1996).

Um crescente aumento no número de registros de danos causados à saúde da população e do ambiente, pelo desenvolvimento de populações de cianobactérias, tem sido relatado ao longo dos anos. No Brasil, o caso mais grave ocorreu em Caruaru, em 1996, quando cinquenta e cinco pessoas submetidas a hemodálises morreram por intoxicação hepática causada pela microcistina, toxina produzida por cianobactérias, conforme citado por Jochimsen et al. (1998). Na região semi-árida do Nordeste do Brasil, a situação é bastante alarmante, pois vários açudes utilizados para o abastecimento das comunidades apresentam freqüentes florações de algas tóxicas. Relatos da ocorrência de florações de cianobactérias têm sido obtidos em vários Estados do Brasil, sendo *Microcystis aeruginosa* a espécie mais comum (Tundisi e Tundisi, 1992).

O gerenciamento e controle de cianobactérias nos sistemas aquáticos, como no caso de reservatórios, podem ser de caráter preventivo ou corretivo (erradicação da floração). Existe uma série de alternativas que podem ser implementadas objetivando a redução dos impactos decorrentes da ocorrência de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, dentre as quais pode-se destacar (Straskraba et al., 1993):

- diminuição das causas do processo de eutrofização, visando a minimização do aporte de nutrientes para os corpos d'água;
- controle dos efeitos oriundos do processo de eutrofização de lagos e reservatórios, através de técnicas que minimizam o desenvolvimento de florações de cianobactérias;
- remoção de cianobactérias e cianotoxinas da água bruta destinada ao abastecimento público, através de processos de tratamento realizados pelas estações de tratamento de água.

Dentre as ações conjuntas capazes de controlar o processo de eutrofização, que vem ocorrendo de forma acelerada nos lagos e reservatórios, os mesmos autores, anteriormente citados, referem:

- boas práticas agrícolas, tais como: controle de erosão, diminuição do uso de pesticidas e herbicidas, uso racional de fertilizantes;
- tratamento de esgoto com remoção de fósforo e nitrogênio;
- economia de água, manejo ambiental para aumentar a capacidade de retenção de água na bacia;
- campanhas contínuas de conscientização ambiental;
- monitoramento do sistema, incluindo vigilância por satélite;
- interação contínua entre projetistas, gerentes e cientistas a fim de endereçar mudanças, atualizando planejamentos e estratégias, desenvolvendo parcerias entre os setores públicos e privados, para melhorar ações de manejo das bacias hidrográficas, que têm interação permanente e dinâmica como os sistemas aquáticos a elas pertencentes, entre eles os reservatórios.

4 ESTUDO DE CASO

O objeto do estudo trata da alocação ótima das águas de um sistema de cinco reservatórios - Jucazinho, Carpina, Goitá, Tapacurá e Várzea de Una, localizado na bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Situa-se na bacia do Capibaribe o “Sistema Tapacurá”, responsável por 43% da água produzida para o abastecimento da Região Metropolitana do Recife (RMR), segundo dados da Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA (2004). Este sistema é formado, atualmente, pelo reservatório Tapacurá, construído em 1973, reservatórios Várzea do Una e Duas Unas, e duas captações a fio d’água no rio Capibaribe, denominadas de Tiúma e Castelo, e a estação de tratamento de água ETA Marechal Castelo Branco, localizada na zona oeste da RMR.

Toda a água captada pelo Sistema Tapacurá é aduzida à ETA, com capacidade de tratamento para $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta vazão, segundo o projeto de 1970, seria produzida pelo reservatório Tapacurá ($3,0 \text{ m}^3/\text{s}$) e pela barragem Duas Unas ($1,0 \text{ m}^3/\text{s}$), no rio Jaboatão. Na realização de novos estudos hidrológicos, em 1982, quando da elaboração do Plano Diretor de Recursos Hídricos da RMR, a regularização do reservatório de Tapacurá foi reavaliada em $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Diante do fato, já em 1987, a cota da soleira do vertedouro central da barragem foi elevada em 3 metros, passando a acumulação de 70,7 milhões de metros cúbicos para 98,7 milhões de metros cúbicos, permitindo uma vazão regularizada de $2,70 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 4.1 ilustra (em linhas de um azul mais escuro) o sistema Tapacurá e a posição dos demais reservatórios que integram o sistema hídrico em estudo, que não considera o reservatório Duas Unas. A seguir, são colocadas informações para uma melhor compreensão deste complexo sistema de abastecimento de água da RMR onde há, permanentemente, déficit de oferta hídrica, abordando-se, também, aspectos provocados pela escassez de água na região de influência do reservatório Jucazinho, no agreste semi-árido da bacia do Capibaribe.

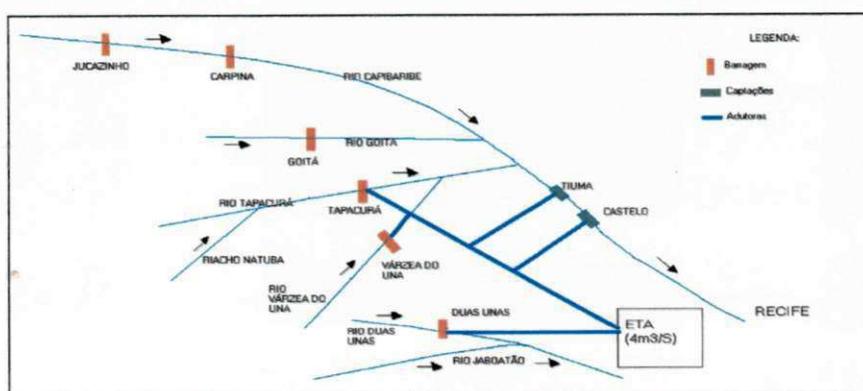


Figura 4.1 – O sistema Tapacurá e a localização dos reservatórios.

4.1 - ASPECTOS DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA RMR

A RMR ocupa uma área de 2.772,7 km², correspondendo a 2,80% do Estado de Pernambuco, e integra 14 municípios: Recife, Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista e São Lourenço da Mata. Reside na sua área urbana uma população de 3.234.647 habitantes, conforme o Censo Demográfico 2000 da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, representando 40,79% da população de Pernambuco. O abastecimento de água da RMR é operado pela COMPESA, onde o elo forte da integração são os chamados “Grandes Anéis” distribuidores de água do Recife, através dos quais vários dos sistemas componentes do conjunto contribuem para a repartição das respectivas produções de água. A Figura 4.2 traz uma configuração dos sistemas de produção e abastecimento de água da RMR.

Dezoito reservatórios, atualmente, fornecem água de superfície para o sistema integrado, enquanto cento e trinta e um poços atendem quarenta e cinco pequenos sistemas em cidades da RMR, como Recife, Olinda, Abreu e Lima, Igarassu, Itapissuma e Ilha de Itamaracá (Medeiros e Montenegro, 2001). Nos últimos anos, sobretudo a partir de 1995, em função das demandas crescentes e da ocorrência de prolongados períodos de estiagem, a produção de água subterrânea foi intensificada passando de um patamar de 1,144 m³/s, em dezembro de 1994, para 1,976 m³/s, em outubro de 1999 (França et al., 1999, apud Medeiros e Montenegro, 2001). Uma parcela da população de maior poder aquisitivo da RMR utiliza água captada através de poços profundos, embora fora do sistema público.

A intensificação da perfuração de novos poços particulares, explorando o aquífero Beberibe, deu-se quando da crise de abastecimento vivenciada no biênio de 1998-1999, estimando-se hoje que existem na RMR cerca de 8.000 desses poços. Conforme o PERH - PE (1998) e Costa et al. (1998), a disponibilidade virtual máxima do sistema aquífero sedimentar da RMR está estimada para exploração em 1,28 m³/s, o que equivale a 80% da sua potencialidade. Vale observar que a vazão atualmente explorada chega a 1,63 m³/s, superando a disponibilidade de exploração.

A diferença entre a disponibilidade e o que se retira anualmente de água subterrânea não permite cogitar incrementos significativos da oferta de água através de poços, uma vez que a taxa de depleção das reservas permanentes já se encontra em nível perigoso para a preservação do manancial subterrâneo, podendo levá-lo à exaustão num futuro próximo. Os

órgãos gestores estão preocupados em exercer com maior rigidez o licenciamento de novos projetos de poços e controlar a exploração das águas subterrâneas da RMR.

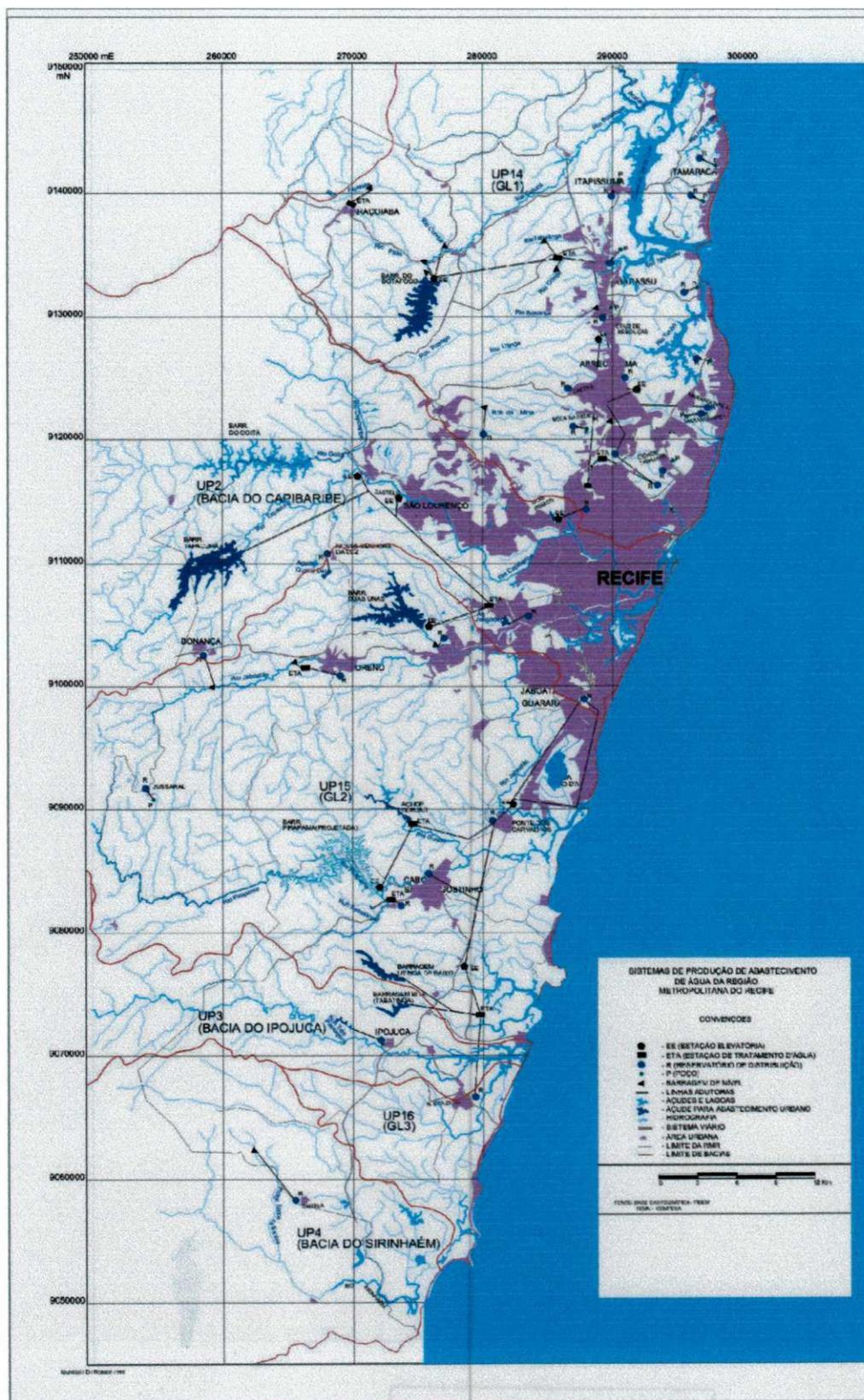


Figura 4.2 - RMR: Sistemas de produção e abastecimento de água (Fonte: PERH – PE, 1998)

De acordo com o Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica - PQA / PE, Relatório Nº 7 (1997), a oferta de água produzida pela COMPESA para a RMR foi avaliada em 10,82 m³/s. Tendo por base dados de produção do 1996, ano em que a COMPESA considera ter havido fornecimento normal de água, Medeiros e Montenegro (2001) avaliaram a oferta em 9,86 m³/s, não considerando a contribuição dos poços particulares (cerca de 1,27 m³/s). Atualizados os dados do PQA / PE (1997), apenas no que tange à vazão captada no aquífero Beberibe, a oferta de água pelo sistema público passa para 11,30 m³/s, como apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Oferta de água de cada sistema produtor no abastecimento da RMR

Setor da RMR	Sistema produtor	*Vazão (m ³ /s)	Participação do sistema produtor no abastecimento da RMR (%)	
			No setor	No total geral
Norte	• Botafogo, Monjope, Beberibe e Dois Irmãos	3,46	63,6	30,6
	• Aquífero Beberibe	1,98 (*)	32,1	17,5
	Subtotal Norte	5,44	100,0	48,1
Oeste	• Sistema Tapacurá: (reservatórios Tapacurá, Duas Unas e Várzea do Una; captações Tiúma e Castelo)	4,54	99,3	40,2
	• Reservatório Jangadinha	0,03	0,7	0,3
	Subtotal Oeste	4,57	100,0	40,5
Sul	• Gurjaú	0,89	69,0	7,9
	• Suape	0,40	31,0	3,5
	Subtotal Sul	1,29	100,0	11,4
Total Geral		11,30	-	100

* Com a perfuração de novos poços (França et al., 1999, apud Medeiros e Montenegro, 2001).

A produção de água do Sistema Tapacurá é distribuída através de tubulações que constituem os Grandes Anéis alimentadores da rede de distribuição de água da RMR nas proporções: (i) 89% para o município do Recife; (ii) 6% para o município de Camaragibe; (iii) 3% para o município de São Lourenço da Mata; (iv) 2% para o município de Jaboatão dos Guararapes, segundo dados da COMPESA (2004). Nos últimos anos, a realidade mostra que o Sistema Tapacurá apresenta, para os níveis projetados, vulnerabilidades no atendimento do abastecimento na RMR, principalmente em períodos hidrológicos críticos. Com efeito, durante a seca de 1993-1994 o reservatório de Tapacurá entrou em colapso, quase se repetindo novo fracasso ao final do ano de 1999.

Em passado recente, analisando-se o período de abril de 1989 a junho de 1997, a variação das vazões produzidas pelo Sistema Tapacurá revelam situações bem distintas (PQA

/ PE, 1997), como a seguir: (i) em um primeiro intervalo, de abril de 1989 a maio de 1993, a vazão explorada manteve certa regularidade, atingindo valores quase sempre superiores a 90% da capacidade máxima de produção do Sistema, acionadas apenas as barragens de Tapacurá e Duas Unas, aumentando-se a contribuição a partir de novembro/90 com a entrada em funcionamento da captação de Tiúma ($Q_{\text{projeto}} = 0,50 \text{ m}^3/\text{s}$); (ii) noutra situação, coincidente com a ocorrência da seca de 1993-1994, que se estendeu de junho/93 a maio/94, houve redução no total das vazões, chegando a menos de $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$, em janeiro/94. Nesse tempo, incorporou-se ao Sistema Tapacurá as vazões da captação de Castelo ($Q_{\text{projeto}} = 1,00 \text{ m}^3/\text{s}$), instalada no rio Capibaribe em outubro/93, e em abril de 1994, já no final do período hidrológico crítico, a contribuição das vazões derivadas do reservatório Várzea do Una ($Q_{\text{projeto}} = 0,54 \text{ m}^3/\text{s}$), e (iii) uma terceira situação ocorre ao final da fase crítica até o mês de junho/97 onde o Sistema, contando com as contribuições de todas as fontes, passa a produzir vazões para atender a capacidade de tratamento ($4,0 \text{ m}^3/\text{s}$) da ETA Marechal Castelo Branco.

Dados históricos de vazões médias mensais captadas no reservatório de Tapacurá, obtidos junto à Divisão de Programas de Controle da Operação - DPCO/CCO da COMPESA, cobrindo o período de janeiro de 1979 a dezembro de 1992, revelam que a vazão média captada foi de $2,649 \text{ m}^3/\text{s}$, com máxima de $3,444 \text{ m}^3/\text{s}$, em março de 1980, e mínima de $1,999 \text{ m}^3/\text{s}$, em abril de 1988. Calculado o desvio padrão de $0,291 \text{ m}^3/\text{s}$ para esta série, considerou-se, para fins do estudo, uma vazão regularizada de $2,40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Do ponto de vista do conjunto das fontes alternativas mobilizadas para superar a deficiência original das vazões do reservatório Tapacurá, atribui-se regularidade de suprimento apenas para a barragem de Duas Unas, embora que na seca de 1993-1994 sua capacidade de regularização ($1,0 \text{ m}^3/\text{s}$) foi reduzida de 80%, chegando a ofertar apenas uma vazão de $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$. A barragem de Várzea do Una alterna períodos de liberação regular com quedas bruscas no fornecimento de água ao Sistema Tapacurá.

Das captações a fio d'água no Rio Capibaribe, apenas a de Tiúma, nos períodos mais recentes de normalidade climática, tem apresentado bom desempenho na oferta de água ficando, na média, próximo à vazão de captação projetada ($Q_{\text{projeto}}=0,50 \text{ m}^3/\text{s}$). A captação de Castelo permanece, desde a sua implantação, com oscilações de vazão constantes, verificando-se que o valor médio captada é pouco superior a 50% daquele previsto no seu dimensionamento ($Q_{\text{projeto}} = 1,00 \text{ m}^3/\text{s}$). As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam fotos das duas captações.

oferta é de apenas 10,0 m³/s. Ainda que estivéssemos com a situação normalizada, estaríamos promovendo rodízios em algumas áreas. O rodízio é o passo anterior ao racionamento". Com essas considerações e mais o que se depreende do PQA/PE (1997), apresenta-se na Tabela 4.2. estimativas da demanda e déficit de água na RMR.

Tabela 4.2 - Demanda e déficit de água na RMR

Ano	Demanda (incluindo perdas da ordem de 40 %)	Déficit
	(m ³ / s)	(m ³ / s)
1999	15,00 (*)	3,70
2010	19,30 (*)	8,48 (*)

(*Fonte: Projeto de Qualidade das Águas de Pernambuco - PQA/PE, 1997).

Ao longo do ano de 1999, a população da RMR experimentou severo racionamento na oferta de água, representado, em média, por um dia com água por outros nove dias com torneiras vazias, provocada pela redução de 51% na capacidade de produção de água bruta de todo do sistema público de abastecimento, o que gerou um déficit da ordem de 63% em relação à demanda. Desde outubro de 2003, o calendário de abastecimento para a cidade de Recife determina um esquema de racionamento, no geral, de vinte horas com água nas torneiras por vinte e oito horas sem água, promovendo-se rodízios por bairros. Tal situação só deverá ser amenizada quando da entrada em operação do sistema adutor da barragem de Pirapama, que ofertará cerca de 1,8 m³/s para o abastecimento da Zona Sul da RMR.

No presente, não se cogita sobre novas possibilidades de aproveitamento, com economicidade, de fontes hídricas superficiais de potencialidade significativa que permitam atender, de imediato e com qualidade, as crescentes demandas por água na RMR. Neste contexto, é importante destacar que o estado de Pernambuco não possui rios de grande extensão nem de grande volume de água, exceção feita ao rio São Francisco, que tangencia a região sertaneja no sudoeste do estado, fazendo limite com a Bahia.

Uma alternativa que será avaliada neste trabalho contempla analisar a operação do reservatório de Carpina, integrada ao reservatório Jucazinho, visando garantir, além do controle de cheias, o aporte de vazões regularizáveis para usos diversos, inclusive para reforço do abastecimento da RMR. Neste sentido, reclamos sociais pressionam os órgãos de governo para que este reservatório passe a operar como fonte de recursos hídricos, tanto para fins do abastecimento industrial e doméstico, controle de cheias, piscicultura e, sobretudo, para garantir vazões para o desenvolvimento da agricultura irrigada, uma das causas de conflitos na região do entorno da represa, o que se caracteriza em um conflito de destinação e uso de recursos hídricos.

4.2 - ASPECTOS DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA REGIÃO DE INFLUÊNCIA DO RESERVATÓRIO JUCAZINHO.

Nesta região, inserida no Agreste de Pernambuco, as populações, urbana e rural, sofrem permanentemente com as limitações e/ou falta de água nos sistemas públicos de abastecimento. Nas estiagens freqüentes, o uso de carros-pipa (Figura 4.5), carros de boi (Figura 4.6), e até de jumentos (Figura 4.7), entre outros recursos emergenciais, são os principais meios de distribuição de água para socorrer as populações. Como principal pólo econômico dessa região, destaca-se a cidade de Caruaru com população de quase 270.000 habitantes.

Na seca de 1998-1999, a situação da falta de água na região também não foi muito diferente da RMR. A cidade de Caruaru, por exemplo, junto com outros dezenove municípios, foi penalizada com a escassez de água para o abastecimento público, representando sofrimento para cerca de 384.000 habitantes. A crise de oferta de água para Caruaru se agravou com o colapso do açude Engenheiro Gersino Pontes (Tabocas), localizado na bacia do rio Capibaribe, na ocasião o principal manancial abastecedor.

Em meados de agosto de 1999, com cinco dos sete açudes em colapso, as reservas de água para abastecimento de Caruaru somavam $4,98 \times 10^6 \text{ m}^3$, representando tão somente 8,13% do potencial de acumulação. A vazão demandada para o abastecimento de Caruaru era da ordem de $0,805 \text{ m}^3/\text{s}$. Como a disponibilidade hídrica dos mananciais só permitia atender cerca de 28,0% dessa demanda, foi adotado um severo racionamento na oferta de água, representado, em média, pelo fornecimento de água durante quatro dias e ficando vinte e seis dias sem água, dentro de um esquema de distribuição por zoneamento de bairros.



Figura 4.5 – Distribuição de água por carro-pipa



Figura 4.6 – Uso do carro de boi para transporte de água

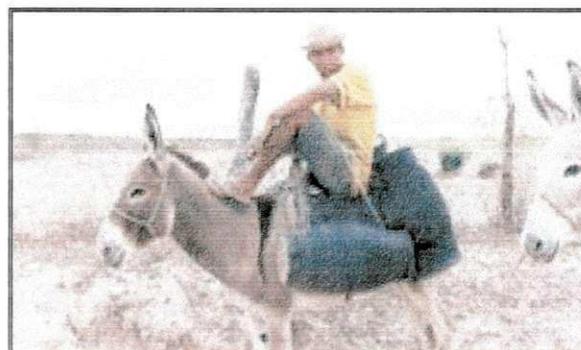


Figura 4.7 - Uso de jumentos para transporte de água

A região de influência do reservatório Jucazinho está assentada sobre rochas do embasamento cristalino, aspecto que torna inexecutável minorar, de forma substancial, a deficiência de abastecimento de água através da captação de águas subterrâneas, salvo para pequenas localidades rurais em que um poço tubular raso pode suprir alguns sistemas simplificados. As águas do aquífero cristalino apresentam restrição para o consumo humano pelos aspectos de quantidade e, principalmente, de qualidade. O Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH-PE (1998), aponta que o valor médio da vazão dos poços perfurados na região se situa entre 2,0 a 2,5 m³/h, apresentando elevada salinidade, com média de resíduo seco de 4.480 mg/l, dureza com média de 543 mg/l e sulfatos com média de 262 mg/l, evidenciando desvios extremamente altos em relação aos valores limites de potabilidade.

Para fazer frente aos problemas de escassez hídrica da região, foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS o reservatório de Jucazinho, para usos múltiplos. O sistema adutor de Jucazinho, ainda em construção, com vazão de projeto definida em 1,80 m³/s, contemplará o abastecimento de quinze sedes municipais e mais quarenta e cinco importantes localidades rurais da região, incluindo a cidade de Santa Cecília, no Estado da Paraíba, beneficiando uma população de projeto estimada em cerca de 716.000 habitantes, no horizonte de 2020. A Figura 4.8 apresenta o arranjo geral do sistema adutor de Jucazinho.

Com esta obra em operação, segundo expectativas oficiais, será minimizado o problema atual do abastecimento d'água da cidade de Caruaru mediante o aporte de uma vazão firme de 998,99 l/s (quase 1,0 m³/s). Uma alternativa que será avaliada neste trabalho contempla o uso das disponibilidades hídricas do reservatório Jucazinho para fins do abastecimento doméstico, controle de cheias, piscicultura, uso ecológico e o condicionamento de vazões para o desenvolvimento da agricultura irrigada, causa que caracteriza na região um conflito de uso quantitativo da água.

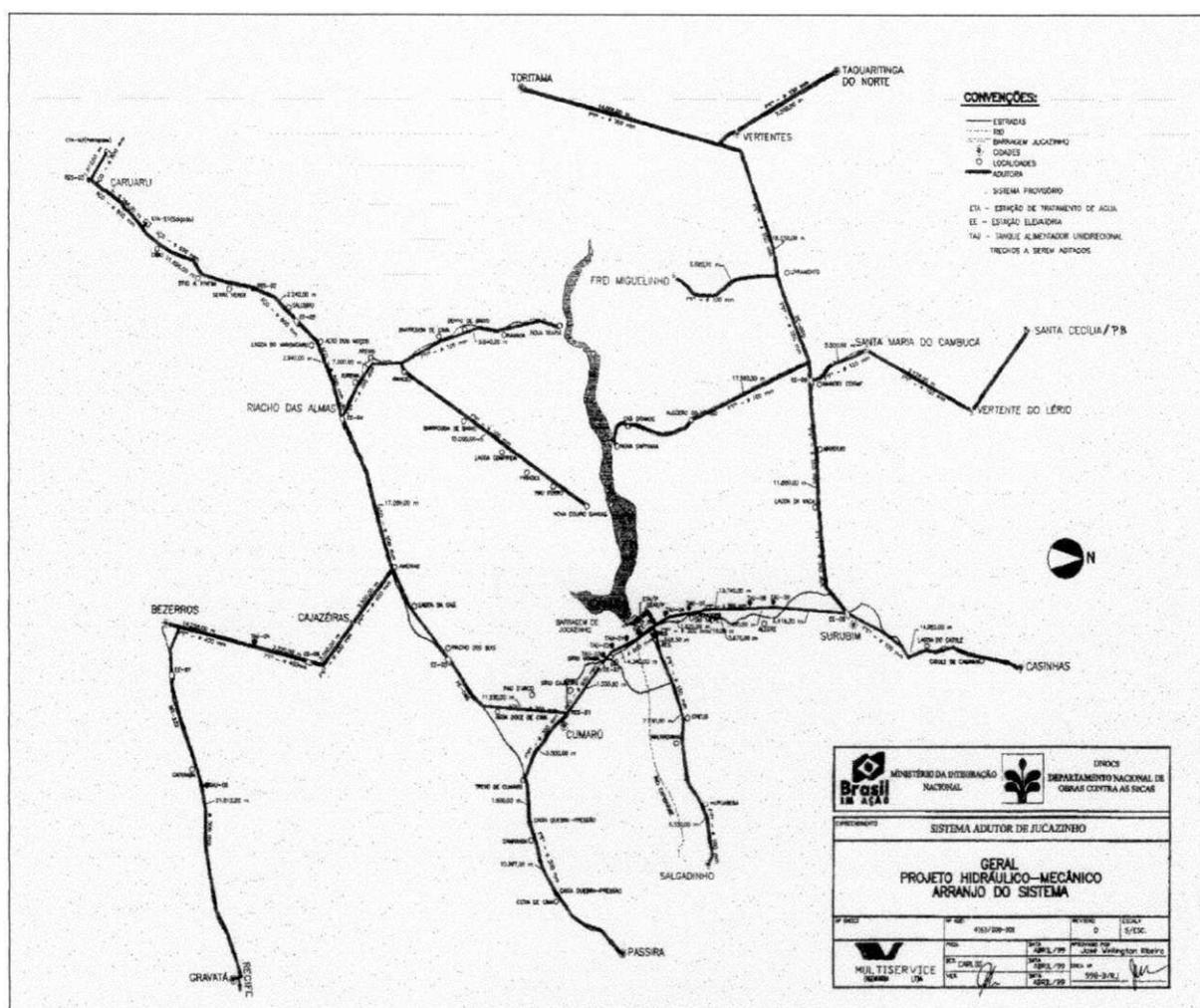


Figura 4.8 - Arranjo geral do sistema adutor de Jucazinho (fonte:DNOCS)

De tudo o que foi até aqui abordado, é importante enfatizar que as áreas de drenagem dos reservatórios Jucazinho, Carpina, Goitá, Tapacurá e Várzea do Una, juntas, compreendem uma sub-bacia com superfície de 6.795,1 km² que corresponde a 89,91% da bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Comentar sobre as características fisiográficas, sociais e econômicas desta sub-bacia significa considerar, praticamente, a bacia hidrográfica do Capibaribe como um todo, o que se detalha na seqüência deste trabalho.

4.3- A BACIA DO RIO CAPIBARIBE

A bacia do Capibaribe conota grande importância sócio-econômica pelas funções que exerce como produtora de alimentos (pesca extrativa e cultivo), navegação recreativa, recepção de despejos e, principalmente, como grande provedora de água para consumo humano, dessedentação de animais, uso industrial e agrícola. Conforme o PERH-PE (1998), o Estado de Pernambuco, para efeito de avaliação de seus recursos hídricos, foi dividido em 29 unidades de planejamento (UP), como apresentado na Figura 4.9.

4.3.1- LOCALIZAÇÃO

A Unidade de Planejamento Hídrico UP2, que corresponde à bacia hidrográfica do rio Capibaribe, está localizada na porção norte-oriental do Estado de Pernambuco, entre 7°41'20" e 8°19'30" de latitude Sul, e 34°51'00" e 36°41'58" de longitude Oeste. Limita-se ao Norte com o Estado da Paraíba, a bacia hidrográfica do rio Goiana (UP1) e primeiro grupo de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos GL1 (UP14); ao Sul com a bacia hidrográfica do rio Ipojuca (UP3) e o segundo grupo de bacias de pequenos rios litorâneos GL2 (UP15); à Leste com o Oceano Atlântico e GL2 (UP15) e à Oeste com o Estado da Paraíba e bacia hidrográfica do rio Ipojuca (UP3). Está inserida nas Mesorregiões: Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e, em grande parte, na Mesorregião do Agreste Pernambucano.

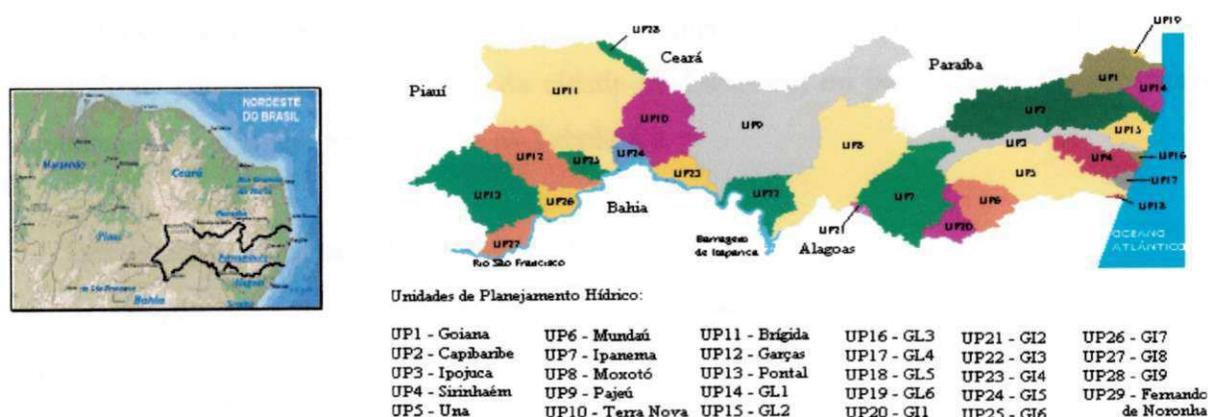


Figura 4.9 - Unidades de Planejamento Hídrico do Estado de Pernambuco.
(Fonte: PERH-PE, 1998)

4.3.2- HIDROGRAFIA

O rio Capibaribe nasce nas encostas da Serra de Jacarara a uma altitude aproximada de 1.000 metros, em terras do município de Jataúba, na Zona do Agreste, próxima à fronteira

4.3.3 – ÁREA, DIVISÃO POLÍTICO-ADMINISTRATIVA, POPULAÇÃO

A bacia do Capibaribe é a maior bacia hidrográfica do Agreste pernambucano, com uma área de 7.557,41 km², representando cerca de 7,64% da área do Estado. Integra 42 municípios, dos quais 27 têm sedes localizadas na bacia, cuja divisão político - administrativa está apresentada no Anexo 1. A população urbana na área de influência do sistema de reservatórios em estudo, com base nos dados do Censo Demográfico realizado no ano de 2000 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi estimada em 2.827.500 habitantes, como consta do Anexo 2, o que representa 35,7% da população de Pernambuco. Os dados do IBGE 2000 definem para Recife uma população urbana de 1.422.905 habitantes.

4.3.4 - CLIMA

Segundo a classificação climática de Thornwaite, o clima se apresenta variado na bacia, sendo do tipo úmido B2s em Recife e São Lourenço da Mata; subúmido C2s entre Glória do Goitá e Paudalho; seco subúmido C1s em Carpina, e semi-árido Dd a partir da cidade de Limoeiro até os limites do Alto Capibaribe (Reis e Lima, 1970).

Nas partes alta e média, situadas na zona do Agreste Semi-Árido, a precipitação média anual é da ordem de 600 mm, caracterizada por uma má distribuição no espaço e tempo. O período chuvoso considera os meses de março a julho (março sendo o mês mais chuvoso), concentrando-se nesse tempo cerca de 65% a 68% da precipitação anual. O trimestre mais seco vai de setembro a novembro. Em algumas áreas isoladas, regionalmente conhecidas como brejos de altitude, como é o caso das Serras de Brejo da Madre de Deus e Taquaritinga do Norte, registram-se totais anuais de até 800 mm a 1.000 mm. Na parte baixa da bacia, a altura de chuva média anual oscila entre 1.000 e 2.000 mm, sendo mais forte na faixa litorânea, com meses mais chuvosos entre maio e junho.

4.3.5 - GEOLOGIA E SOLOS

Cerca de 95% da superfície da bacia do Capibaribe está assentada sobre a formação cristalina, constituída por rochas do pré-cambriano indiviso e pré-cambriano superior. Na Figura 4.11, apresenta-se o mapa geológico da bacia do Capibaribe, conforme PERH-PE (1998). Os solos se apresentam, no geral, muito rasos e com uma grande frequência de afloramentos rochosos, exceto na faixa litorânea. A descrição detalhada dos solos da bacia

está contida no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco (1973).

Resumidamente, pode-se apontar que: (i) quase à foz do rio Capibaribe, ocorrem Podzól Hidromórficos e Areias Quartzosas Marinhas, que são solos com sérias limitações para uso agrícola, em sua maior parte ocupada por áreas urbanas; (ii) no terço inferior, desde a foz até a altura da cidade de Carpina, predominam solos desenvolvidos, profundos, apropriados para cultivos temporários e perenes, ocorrendo Latosol Vermelho Amarelo Eutróficos e Distróficos (LVe1, LVe7, LVd1, LVd2, LVd8) e Podzólico Vermelho Amarelo e Distrófico, PE3 e PVI com grande domínio de solos com relevo entre plano a suave ondulado; (iii) na porção mais oeste do terço inferior, destacam-se solos pouco desenvolvidos tendo em vista a transição para o cristalino, onde ocorrem Bruno não Cálcicos (NC7), desde Limoeiro até próximo à sede municipal de Paudalho, que são solos pouco desenvolvidos e apresentam baixa capacidade de retenção hídrica face à condição de solos rasos, o que os faz pouco apropriados para agricultura, mesmo que temporária e de sistema radicular superficial; são utilizados, via de regra, com pastagens que parece ser o melhor uso econômico, embora, não resista a pastoreios intensivos; (iv) no terço médio da bacia dominam solos pouco desenvolvidos como Regossolos, Planossolos, Solos Litólicos, Vertissolos e Podzólicos plínticos; ocorrem desde Salgadinho até o oeste de Toritama; (v) o terço superior da bacia, compreende áreas dos municípios a oeste de Vertentes incluindo Jataúba, Brejo da Madre de Deus e Santa Cruz do Capibaribe; nesta área ocorrem várias classes de solos com ênfase os Latossolos, Podzolicos Eutróficos e Distróficos, Planossolos Solódicos, Solonetz Solodizados, Regossolos, Vertissolos, Bruno não Cálcico e Solos Litólicos (LVd12).

Com grande número de classes de solo, a bacia do rio Capibaribe apresenta como característica a ocorrência de manchas de solos potencialmente utilizáveis, de forma econômica. Destaques cabem ser feitos, como é o caso dos Podzólicos (PE3) agricultáveis que representa 3,83% da área da bacia. Quanto aos solos vocacionados para pastagens, o destaque fica para os Planossolos que cobrem cerca de 25% da bacia, com grande domínio nos terços médio e superior.

4.3.6 - VEGETAÇÃO, RELEVO, USO DO SOLO

Na porção semi-árida da bacia, predomina a vegetação caatinga do tipo hipo e hiperxerófila, com alguns enclaves de mata serrana que constituem pequenos brejos de altitude, como em Taquaritinga do Norte e Brejo da Madre de Deus. Na parte oriental da bacia, encontra-se em menor porção a zona fitogeográfica da Mata, representada pelas sub-

zonas úmida e seca já bastante degradadas, coberta parcialmente com cana-de-açúcar e pastagens. A Figura 4.12 contempla o relevo e vegetação da bacia do Capibaribe, com base em cenas LandSat-TM, bandas 7, 4 e 1.

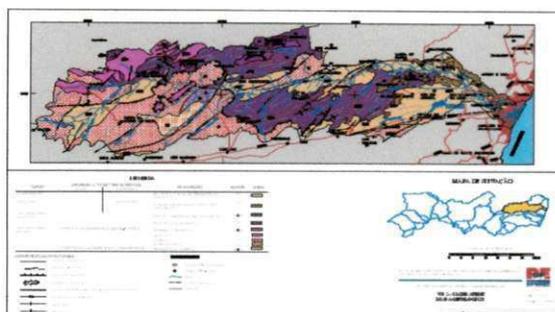


Figura 4.11 - Mapa geológico.
(Fonte: PERH-PE, 1998)

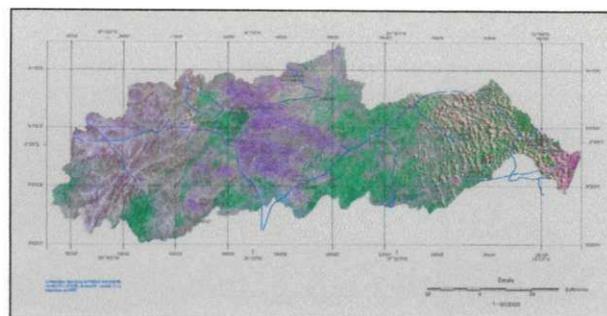


Figura 4.12 - Relevo e cobertura vegetal
(Fonte: PERH-PE, 1998)

O relevo da bacia do Capibaribe não é homogêneo, apresentando-se como montanhoso e forte ondulado nas regiões do extremo oeste, sudoeste e sul; como também ao norte na linha de fronteira com o estado da Paraíba. Nestas áreas destacam-se os centros orográficos da serra de Brejo da Madre de Deus, a sudoeste, com elevações em torno de 1.200 m acima do nível do mar, e a serra de Taquaritinga do Norte, com altitude de 900 m, mais a noroeste do trecho alto da bacia. Na zona central da bacia o relevo é, predominantemente, suave e ondulado, amenizando-se no sentido leste, passando a suave ondulado a plano, na parte litorânea. As diferentes classes de vegetação e de uso do solo, com suas respectivas áreas e o percentual de ocupação na bacia, estão indicados na Tabela 4.4, incluindo-se as áreas sombreadas e cobertas por nuvens no momento da tomada da cena LandSat, como ilustrado na Figura 4.12.

Tabela 4.4 - Vegetação / Uso do Solo na bacia do rio Capibaribe

Vegetação / Uso do Solo	Área (km ²)	Percentual (%)
Vegetação arbórea fechada	450,34	5,96
Açude	14,37	0,19
Solo exposto	899,14	11,98
Mangue	60,85	0,81
Oceano	1,11	0,01
Vegetação arbustiva arbórea fechada	649,93	8,60
Vegetação arbustiva arbórea aberta	5,70	0,07
Mata atlântica	280,95	3,72
Antropismo	2.279,18	30,12
Cana	2.554,75	33,76
Área urbana	114,36	1,51
Sombras e nuvens (pela imagem LandSat)	246,72	3,27
Total	7.557,40	100,00

4.3.7 - OS RECURSOS HÍDRICOS

4.3.7.1 - VAZÕES

Tratando-se de uma região em que as precipitações pluviais se apresentam com distribuição mensal e interanual bastante irregular, tanto no espaço quanto no tempo, o mesmo se observa em relação aos deflúvios. Segundo o PERH/PE (1998), para avaliação das potencialidades hídricas, a bacia do rio Capibaribe foi dividida em três sub-bacias, a saber: o Alto Capibaribe, a montante de Toritama, com área de drenagem de 2.750 km²; o Médio Capibaribe, entre Toritama e Limoeiro, com 2.900,4 km², e o Baixo Capibaribe, entre Limoeiro e Recife, com 1.907 km². Pelo PERH/PE (1998), o potencial de águas superficiais na bacia do Capibaribe pode ser resumido através dos seguintes parâmetros: (i) potencialidade de 632,3 x 10⁶ m³/ano; (ii) vazão média anual de 20,05 m³/s; (iii) precipitação total anual de 1.095,0 mm; (iv) vazão específica de 2,77 l / s / km²; e (v) rendimento superficial médio de 7,98%. Na Tabela 4.5, estão apresentadas as vazões médias (potencialidades) na bacia do rio Capibaribe, com base no período 1963 a 1985.

Tabela 4.5 - Vazões médias (potencialidades) da bacia do rio Capibaribe.

Sub-bacia do Alto Capibaribe (Estação Toritama: área de 2.750 km²)			
Médias interanuais		Vazões igualadas ou superadas	
Vazão média	2,37 m ³ /s	(%)	(m ³ /s)
Volume médio	74,75 x 10 ⁶ m ³	90	0,3
Lâmina média	27,2 mm	80	0,5
Precipitação média	523,7 mm	50	1,4
Rendimento (%)	5,2	20	3,7
		10	6,5
Sub-bacia do Médio Capibaribe (Estação Limoeiro: área de 5.650 km²)			
Médias interanuais		Vazões igualadas ou superadas	
Vazão média	4,86 m ³ /s	(%)	(m ³ /s)
Volume médio	153,21 x 10 ⁶ m ³	90	1,7
Lâmina média	27,1 mm	80	2,3
Precipitação média	615,9 mm	50	3,9
Rendimento (%)	4,4	20	6,8
		10	9,0
Sub-bacia do Baixo Capibaribe (Estação São Lourenço da Mata: área de 1.590 km²)			
Médias interanuais		Vazões igualadas ou superadas	
Vazão média	13,86 m ³ /s	(%)	(m ³ /s)
Volume médio	437,1 x 10 ⁶ m ³	90	8,0
Lâmina média	274,9mm	80	10,0
Precipitação média	1.095,0 mm	50	13,9
Rendimento (%)	25,1	20	17,7
		10	19,7

(Fonte: PERH/PE (1998))

4.3.7.2 - O PROBLEMA DAS ENCHENTES

O regime de escoamento dos cursos d'água da bacia do Capibaribe, sendo, na sua maior parte, torrencial e temporário, está diretamente ligado ao regime pluvial. A ocorrência de períodos bastante chuvosos, ocasionando deflúvios acentuados, aumenta a probabilidade da formação de cheias na bacia, por vezes excepcionais, a exemplo do que já se registrou no passado. Cronologicamente, embora existam registros de cheias catastróficas que remontam ao ano de 1842, algumas características das maiores cheias ocorridas no rio Capibaribe, em épocas recentes, estão referenciadas na Tabela 4.6, realçando-se a contribuição dos trechos alto, médio e baixo dessa bacia para a formação das enchentes em Recife.

A cheia de 1975, considerada a maior calamidade do século, ocorreu entre os dias 17 e 18 de Julho, deixando 80% do perímetro urbano da cidade do Recife sob as águas. Causando a morte de 107 pessoas e desabrigando outras 350 mil, a cheia atingiu outros 25 municípios da bacia do Capibaribe. Na capital e interior, 1.000 km de ferrovias foram interditados, pontes desabaram, casas foram arrastadas pelas águas.

Só no Recife, trinta e um (31) bairros, trezentas e setenta (370) ruas e praças ficaram submersos; 40% dos postos de gasolina da cidade foram inundados, o sistema de energia elétrica foi cortado em 70% da área do município, e quase todos os hospitais recifenses ficaram inundados. Por terra, o Recife ficou isolada do resto do País durante dois dias. Nessa época, concluída no ano de 1973, só existia a barragem de Tapacurá, operando na atenuação das cheias do rio Tapacurá. A Figura 4.13 registra flagrantes da inundação de 1975.

Tabela 4.6- Parâmetros de cheias recentes do rio Capibaribe

Data da Enchente	Vazão nos Postos Fluviométricos (m ³ /s)		Contribuição das partes da bacia na formação de enchentes no Recife (%)	
	Limoeiro	S. Lourenço	Alta e Média	Baixa
03/1960	1.350	1.300	54	46
06/1965	640	1.420	27	73
06/1966	1.450	2.200	44	56
03/1969	780	850	66	34
07/1970	820	1.650	33	67
08/1970	395	900	22	78
07/1975	2.300	3.400	45	55

(Fonte: Pereira, 1976).



Figura 4.13 - Cenas de áreas inundadas pela cheia de 1975 na cidade de Recife.
(Fonte: Pernambuco de A/Z - <http://www.pe-az.com.br>, 09/02/04)

Os problemas causados pelas enchentes de 1975 e a evidência histórica de que os trechos médio e baixo do rio Capibaribe contribuem, de forma substancial, na formação das cheias, fez com que Governo Federal, à época, através do Departamento de Obras de Saneamento - DNOS, definisse obras hidráulicas para a defesa do Recife contra as inundações (Pereira, 1976). As intervenções de maior vulto foram: i) a construção da barragem Carpina, no rio Capibaribe (concluída em 1978), que permite laminar uma vazão efluente máxima de $300 \text{ m}^3/\text{s}$; ii) a construção da barragem Goitá (concluída em 1978), para controle de cheias do rio Goitá, afluente da margem direita do rio Capibaribe, permitindo laminar uma vazão efluente máxima de $100 \text{ m}^3/\text{s}$; iii) intervenções no leito do rio Capibaribe, no Recife, visando aumentar a capacidade de escoamento da calha urbana, de modo a comportar uma descarga de $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$, o que não foi ainda efetivado (atualmente a capacidade da calha fica em torno de $700 \text{ m}^3/\text{s}$); (iv) melhorias na operacionalidade da barragem Tapacurá, projetada para laminar uma descarga máxima de $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

Em segunda prioridade, foi também cogitada a construção da barragem de Malhadinha, um pouco a montante da cidade de Limoeiro, no rio Capibaribe. Em 1998, o DNOCS transformou essa idéia na construção da barragem de Jucazinho, para usos múltiplos, incluindo o controle de cheias da parte alta da bacia do rio Capibaribe.

4.3.7.3 - INFRA-ESTRUTURA HIDRÁULICA EXISTENTE

Na bacia do Capibaribe foram identificados 911 açudes com base em imagens do satélite Landsat 5, conforme consta do PERH-PE (1998). A maior parte, num total de 892, tem capacidade de acumulação inferior a 500.000 m^3 . Apenas sete têm capacidade maior que $10.000.000 \text{ m}^3$. A Tabela 4.7 apresenta algumas características dos principais reservatórios.

Nas Figuras 4.14 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) estão apresentadas fotos das barragens de Jucazinho, Tapacurá, Goitá, Várzea do Una e Carpina. Para esta última, uma vista de

montante da galeria de tomada d'água (tipo torre), observando-se o lago praticamente seco, e outra da galeria na saída do canal de restituição ao rio Capibaribe, a jusante.

Tabela 4.7 - Principais reservatórios da bacia do Capibaribe

Reservatório	Município	Capacidade (m ³)	Finalidade
Tapacurá	São Lourenço da Mata	98.700.000	Abastecimento e controle de cheia
Várzea do Una	São Lourenço da Mata	11.600.000	Abastecimento
Goitá	Glória do Goitá	54.032.260	Controle de cheia
Cursai	Paudalho	7.684.000	Abastecimento
Carpina	Carpina	270.000.000	Controle de cheia
Jucazinho	Surubim	327.035.812	Uso múltiplo
Poço Fundo *	Sta. Cruz Capibaribe	27.750.000	Abastec./ irrigação
Eng. Gersino Pontes (Tabocas) *	Caruaru	12.755.524	Abastec./ irrigação
Oitis (*)	Brejo Madre Deus	3.020.159	Abastecimento e irrigação
Machado *	Brejo Madre Deus	1.228.340	Abastecimento

* Reservatórios localizados a montante da barragem de Jucazinho.

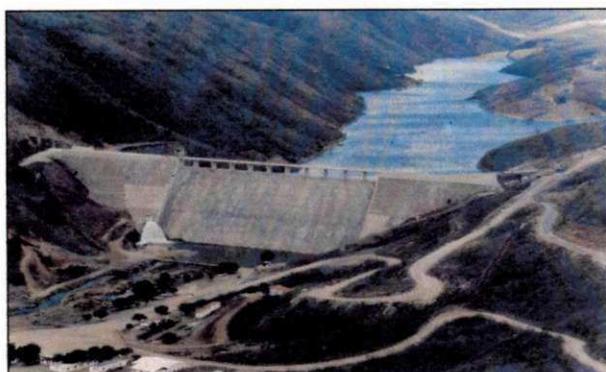


Figura 4.14 (a) - Barragem Jucazinho
(Fonte: DNOCS, 1998)

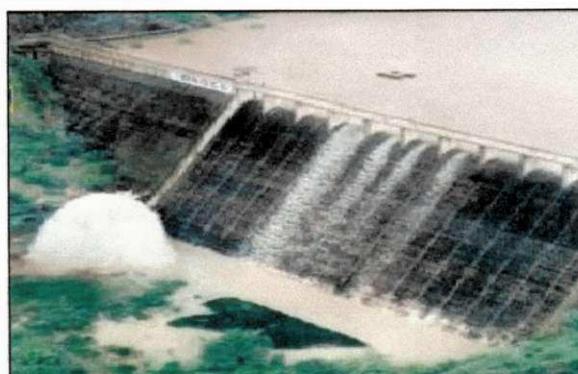


Figura 4.14 (b) - Jucazinho sangrando
(Fonte: Jornal do Comércio, 07/02/04)

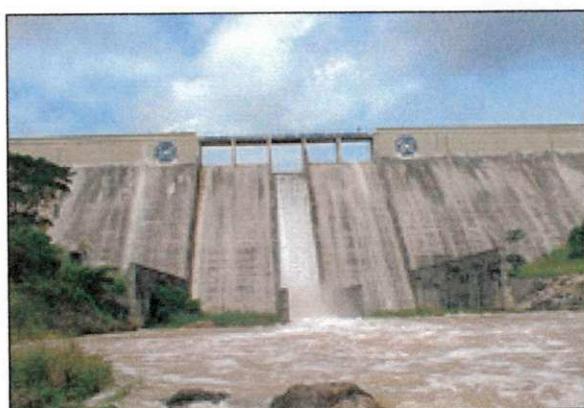


Figura 4.14 (c) - Barragem Tapacurá
(Fonte: SRH - PE, 2000)



Figura 4.14 (d) - Barragem Goitá (montante)
(Fonte: SRH - PE, 2000)



Figura 4.14 (e) - Barragem Várzea do Una
(Fonte: SRH - PE, 2000)

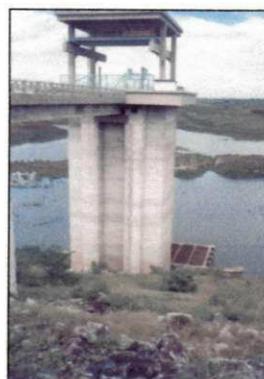
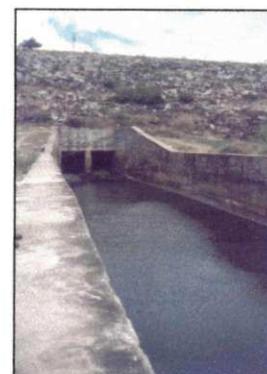


Figura 4.14 (f) - Barragem Carpina
(Fonte: acervo do autor)



Na Figura 4.15, uma vista de jusante da adutora de Jucazinho (DN 2000 mm, em aço) e da válvula dispersora (tipo Howwel-Bunger), instaladas na tomada d'água da barragem.



Figura 4.15 - Vista de jusante da adutora e válvula dispersora de Jucazinho
(Fonte: acervo do autor)

A respeito dos cinco reservatórios em estudo, cabe um comentário: a Constituição Brasileira de 1988, no tocante ao domínio dos corpos d'água no Brasil, preceitua que “A água

é do domínio da União e dos Estados; da União são as águas dos rios que atravessam ou limitam dois ou mais estados, ou são compartilhados com outros países; dos estados são os rios que nascem e morrem nos seus limites; são também domínio da União as águas situadas em reservatórios por ela construídos”. O rio Capibaribe é um rio de domínio do Estado de Pernambuco. Como a construção dos reservatórios de Jucazinho, Carpina e Goitá foi realizada pelo Governo Federal, entende-se que as águas ali represadas são do domínio da União, o que não se aplica às águas dos reservatórios Tapacurá e Várzea do Una.

4.3.7.4 - QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS

O monitoramento da qualidade das águas superficiais é feito com base em 11 estações de amostragem mantidas pela Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - CPRH. A classificação da qualidade da água é feita com base nos usos preponderantes, observados os limites de classe dos parâmetros de acordo a Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005. Na Figura 4.16, indica-se a localização das estações da CPRH; na Tabela 4.8 estão apresentados índices de qualidade da água na bacia do Capibaribe, para algumas das estações, destacando-se o Índice de Qualidade de Água - IQA (Fonte: Resultados do Monitoramento das Bacias: Relatório da Bacia do Rio Capibaribe - CPRH, 2005).

O IQA é determinado pelo produtório ponderado dos parâmetros: Temperatura; potencial Hidrogeniônico - pH; Oxigênio Dissolvido - OD; Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO; Coliformes Fecais - CF; Nitrogênio Total; Resíduo Total, Fosfato Total e Turbidez, fornecendo um número entre 0 e 100, como um conceito de qualidade. A Tabela 4.9, segundo o PERH-PE (1998), resume a classificação da qualidade da água em função de valores do IQA.

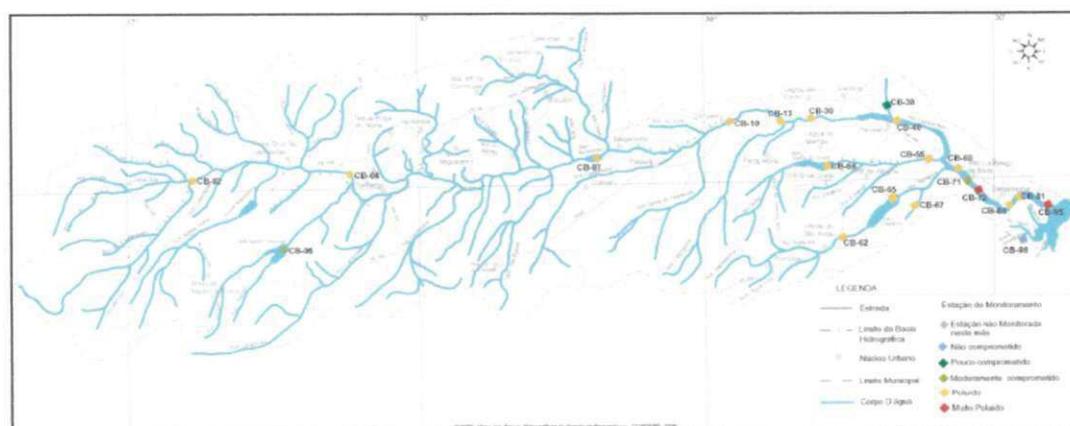


Figura 4.16 – Estações de monitoramento dos corpos d'água do Capibaribe (Fonte: CPRH, 2005)

Tabela 4.8 - Qualidade da água do rio Capibaribe (Fonte: CPRH, 2005).

ESTAÇÃO	CORPO D'ÁGUA	MUNICÍPIO	LOCAL	CLASSIFICAÇÃO DE QUALIDADE
CB-02 informações de Maio/05	Rio Capibaribe	Santa Cruz do Capibaribe	Na barragem Poço-Fundo de captação da Compesa	Poluída ●
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/69	Eutrófico/60		Não Tóxico
CB-05 informações de Out/05	Rio Tabocas	Toritama	Na barragem Tabocas de captação da Compesa	Moderadamente comprometida ●
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/75	Mesotrófico/48	Baixo	Não Tóxico
CB-07 informações de Dez/05	Rio Capibaribe	Surubim	Na barragem de Jucazinho e captação da Compesa.	Poluída ●
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/61	Eutrófico/66	Alto	Não Tóxico
CB-10 informações de Dez/05	Rio Capibaribe	Limoeiro	A jusante da Cidade de Limoeiro	Poluída
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
			Muito Alto	
CB-13 informações de Out/05	Rio Capibaribe	Lagoa do Carro	Na barragem de Carpina de contenção de enchente e captação da Compesa.	Poluída ●
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/65	Eutrófico/58	Alto	Não Tóxico
CB-38 informações de Out/05	Rio Cursai	Paudalho	Na barragem de Cursai de captação da Compesa.	Pouco comprometida ●
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/77	Oligotrófico/42	Baixo	Não Tóxico
CB-54 informações de Out/05	Rio Goitá	Paudalho	Na barragem de Goitá de contenção de enchente.	Poluída ●
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/69	Oligotrófico/30	Baixo	Não Tóxico
CB-55 informações de Out/05	Rio Goitá	São Lourenço da Mata / Paudalho	Antes do deságüe do Rio Goitá no Rio Capibaribe.	Poluída
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
			Baixo	
CB-60 informações de Dez/05	Rio Capibaribe	São Lourenço da Mata	Captação da Compesa, em Tiúma, após receber seus afluentes Goitá e Tapacurá.	Poluída
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/64		Médio	Não Tóxico

Tabela 4.8 (continuação)

ESTAÇÃO	CORPO D'ÁGUA	MUNICÍPIO	LOCAL	CLASSIFICAÇÃO DE QUALIDADE
CB-65 informações de Dez/05	Rio Tapacurá	São Lourenço da Mata	Na Barragem de Tapacurá e captação da Compesa.	Poluída
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/59	Hipertrófico/79		Não Tóxico
CB-67 informações de Nov/05	Rio Várzea do Una	São Lourenço da Mata	Na barragem da Várzea do Una de captação d'água da Compesa	Poluída
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/64	Eutrófico/68		Não Tóxico
CB-71 informações de Out/05	Rio Capibaribe	São Lourenço da Mata	Na captação da Compesa, em Castelo.	Moderadamente comprometida
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
	Boa/63			Não Tóxico
CB-95 informações de Dez/05	Rio Capibaribe	Recife	Ponte na rua Eng.º Abdias de Carvalho, Ilha do Retiro, em frente ao Sport Clube do Recife.	Muito poluída
	IQA	IET	RISCO DE SALINIDADE	ECOTOXICIDADE
				Alta ação alotrópica

Tabela 4.9 - Qualidade da Água em Função do IQA (Fonte PERH-PE, 1998)

Qualidade da Água	Valor do Índice – IQA Calculado
Excelente	80 - 100
Boa	52 - 79
Aceitável	37 - 51
Ruim	20 - 36
Péssima	0 - 19

A Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA, órgão mantenedor dos sistemas de abastecimento de água existentes, executa análises físico-químicas sistemáticas para verificar a qualidade da água bruta dos reservatórios por ela operados, visando o tratamento e a distribuição dentro dos padrões de potabilidade recomendados.

Estudos do DNOCS (1992), apontam que as águas do reservatório de Jucazinho são quimicamente classificadas como Cloretadas Sódicas (Tabela 4.10). Conforme estudos da Companhia Integrada de Serviços Agropecuários de Pernambuco - CISAGRO (1991), as águas do Capibaribe na área do reservatório Carpina, são classificadas quimicamente também como Cloretadas-Sódicas (Tabela 4.11).

Tabela 4.10 - Resultados de análises de águas do reservatório Jucazinho.

Local	Classificação	
	Potabilidade	Irrigação
Rio Capibaribe, em Jucazinho	3 (2) *	C3-S1
Rio Capibaribe, em Bateria (3,3 km a montante)	3 (2) *	C3-S1
Rio Capibaribe, em Capela Nova	2 (2) *	C3-S1
Rio Capibaribe, em Trapiá	3 (2) *	C3-S1

* Classe 2 quanto aos outros elementos, exceto Ferro (Fe).

Tabela 4.11 - Resultados de análises de águas do reservatório Carpina

Local	Classificação	
	Potabilidade	Irrigação
Rio Capibaribe, barragem Carpina(inverno)	3 (2)*	C3-S1
Rio Capibaribe, em Limoeiro (inverno)	2	C2-S1
Rio Capibaribe, em Limoeiro (verão)	3	C3-S1

* Classe 2 quanto aos outros elementos, exceto Ferro; Cloreto; pH; Sódio+Potássio.

Costume dos mais danosos ao meio ambiente é o de lançar aos rios os despejos domésticos e os resíduos industriais não tratados. Segundo dados do PQA / PE (1997), na bacia do rio Capibaribe o peso da carga poluidora decorrente dos esgotos sanitários é muito mais elevada do que a de origem industrial, oscilando em torno de 95% da carga total, razão da inexistência de serviços de coleta e de tratamento de esgotos oriundos das ocupações urbanas atravessadas por esse rio e alguns afluentes. As populações rurais e grande parte da urbana utilizam soluções isoladas como fossas negras e sépticas, ou às vezes nenhuma das duas, contaminando, direta ou indiretamente, os corpos de água. Das cidades existentes na bacia, apenas Recife e Vitória de Santo Antão possuem redes de esgoto que atendem a um baixo percentual de suas populações, com cerca de 25% a 30% de domicílios atendidos.

Quanto aos Índices do Estado Trófico - IET da Tabela 4.8, chama-se atenção para o caso do reservatório de Tapacurá, uma vez ser preocupante a condição de eutrofização no mesmo, conforme estudos da CPRH, em 2005. Estima-se que cerca de 1,83 mil toneladas de DBO provenientes dos esgotos domésticos, principalmente dos esgotos da cidade de Vitória de Santo Antão, alcança o rio Tapacurá, principal formador da represa (PERH-PE, 1998). Em grande parte da bacia do Tapacurá, produz-se farinha de mandioca cujo processo artesanal gera a manipueira como efluente, um resíduo altamente tóxico pela elevada concentração de cianeto, acidez que reduz o pH do corpo receptor, além de ter fósforo, nitrogênio, sólidos dissolvidos e particulados também em teores elevados. O sedimento na área do reservatório

de Tapacurá já apresenta alta concentração de herbicidas, carregados dos cultivos de olerícolas folhosas nas suas margens e canaviais da região.

Pela Figura 4.17, observa-se que o IET apresenta no Tapacurá uma relação inversa com o percentual do volume acumulado, ou seja, quanto maior o volume menor o IET. Durante a estação chuvosa de 2004, quando o reservatório verteu, no período de maior volume acumulado (100 e 97%) o parâmetro que mais influenciou o IET foi o Fósforo, enquanto que no restante do tempo, a Clorofila foi mais influente. A Figura 4.18 apresenta relação entre o volume de água acumulado e o parâmetro Clorofila, constatando-se que valores menores do parâmetro ocorrem quando o volume acumulado esteve alto.

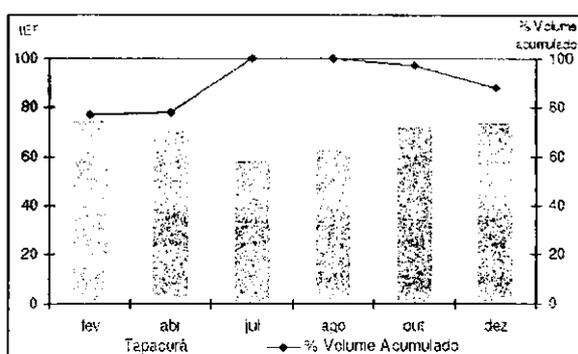


Figura 4.17 - Relação entre o IET e o volume do Tapacurá (Fonte: CPRH, 2005)

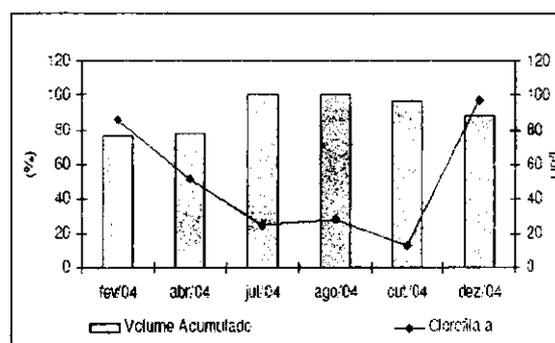


Figura 4.18 - Relação entre a clorofila e o volume do Tapacurá (Fonte: CPRH, 2005)

4.3.7.5 - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A bacia do rio Capibaribe tem 95,6% da sua área assentada sobre rochas do embasamento cristalino, com reduzida capacidade de acumulação de água. Os principais aquíferos estão localizados na planície sedimentar litorânea, no baixo curso do rio, compreendendo o aquífero Beberibe, que se desenvolve mais para o norte, caracterizado pelo predominância de arenitos; o aquífero Cabo, mais ao sul, com predomínio de arenito argiloso, e o aquífero Boa Viagem, caracterizado pela alternância de areia e argila na granulometria do sedimento, recobrando ora o aquífero Beberibe como o Cabo, ora diretamente o embasamento Cristalino. Na periferia da planície dominam os morros que representam o aquífero Barreiras, de baixa potencialidade hídrica devido à predominância de siltes e argilas na sua composição.

Dados cadastrais do PERH/PE (1998) apontam que as águas do aquífero sedimentar podem ser consideradas como “águas doces”, vez que 95,35% das análises de água de poços existentes indicam um resíduo seco RS inferior a 500mg/l, enquanto os restantes 4,65% possuem RS entre 500 a 1.000mg/l, ainda inferior ao limite de potabilidade de 1.000mg/l.

Para fins de irrigação, segundo critérios do United State Salinity Laboratory (USSL), referidos no PERH-PE (1998), as águas deste aquífero se adaptam bem a qualquer solo e cultura irrigável, classificadas nas classes C1-S1 (90% das análises) e entre C2-S1 e C3-S1 (10% das análises).

As águas do aquífero cristalino são de elevada salinidade, com Resíduo Seco (RS) médio de 4.480 mg/l; Dureza média de 543 mg/l e Sulfatos com média de 262 mg/l, evidenciando altos desvios em relação aos valores limites de potabilidade. Características de poços cadastrados estão resumidas na Tabela 4.12, com base no PERH-PE (1998). O valor médio da vazão, em relação ao padrão médio do aquífero cristalino no restante do Nordeste semi-árido, acha-se um pouco acima da média geral de 2,0 a 2,5 m³/h.

Tabela 4.12 - Parâmetros estatísticos de poços do aquífero cristalino na bacia do Capibaribe

Parâmetro	Profund. (m)	NE (m)	ND (m)	Vazão (m ³ /h)	CE
Média	49,70	7,00	27,70	3,20	1.494,7
Desvio Padrão	16,80	6,70	14,90	3,90	649,7
Coef. Variação	33,80	95,71	60,32	121,87	43,3
Valor máximo	130,00	40,00	89,00	40,00	26.809,0
Valor mínimo	11,00	0,00	0,10	0,00	0,1
N.º de Valores	461	333	315	394	129

NE=Nível Estático; ND=Nível Dinâmico; Profund.=Profundidade; CE=Condutividade Elétrica

Na classificação iônica a água do aquífero cristalino é do tipo cloretada mista a cloretada sódica. A Tabela 4.13 apresenta uma classificação dessas águas, para os diversos usos.

Tabela 4.13 - Classificação das águas do aquífero cristalino para os diversos usos

Classificação para consumo humano		
Tipos de água	RS (mg/l)	% (*)
Doce	< 2.000	35,96
Salobra	2.000 – 6.000	46,49
Salgada	6.000 – 40.000	17,55
Salmoura	> 40.000	0
Classificação para uso na irrigação		
Classe	Riscos de Salinidade/ Sódio	% (*)
C1S1-C2S1	Baixo a Médio / Baixo	9,00
C3S1-C3S2	Alto / Baixo a Médio	9,00
C4S1-C4S4	Muito Alto / Médio a Forte	33,00
C5S2 - C5S4	Excep.Alto / Médio a Muito Forte	49,00
Classificação para consumo animal:		
Classe	RS (mg/l)	% (*)
Boa	≤ 2.500	41,00
Satisfatória	2.500 – 3.500	10,79
Pobre	3.500 – 4.500	14,40
Insatisfatória	≥ 4.500	33,81

(*) % do total de análises físico-químicas de águas de poços cadastrados (Fonte PERH - PE, 1998).

4.3.8 - REDE PLUVIOMÉTRICA

A rede pluviométrica da bacia do Capibaribe, originária da rede básica da extinta SUDENE, é administrada pelo Governo do Estado. Conta com cerca de 46 postos, com registros desde o ano de 1911, para alguns deles. Estão disponíveis dados pluviométricos diários e mensais em bancos de dados, cobrindo, basicamente, até o ano de 1994, com alguns registros até anos mais recentes. A Figura 4.19 posiciona (pontos em vermelho) postos pluviométricos da bacia do Capibaribe, e alguns postos vizinhos, muitos deles utilizados no estudo, como se detalha no Capítulo 6.

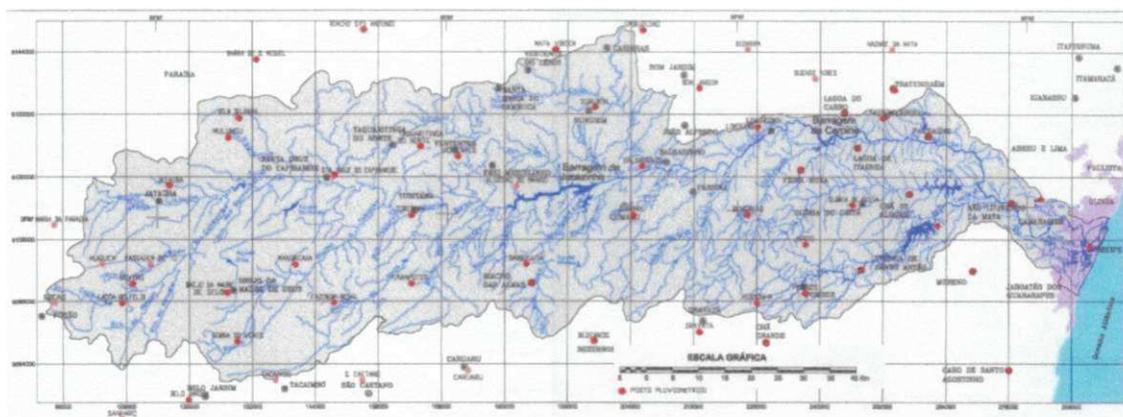


Figura 4.19 - Postos pluviométricos na bacia do Capibaribe (Fonte: SRH - PE, 2000)

4.3.9 - REDE FLUVIOMÉTRICA

A rede fluviométrica é composta por 14 estações operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. O Diagrama Unifilar dessa rede, com indicativos dos reservatórios em estudo, está apresentado na Figura 4.20. No estudo foram utilizados dados de vazão das estações Toritama (código 39130000), Limoeiro (código 39145000), Vitória de Santo Antão (código 39170000) e Sítio Engenho (código 39155000), como detalhado no Capítulo 6.

4.3.10 - REDE CLIMATOLÓGICA

Localizam-se na bacia do Capibaribe duas estações meteorológicas, uma em Surubim, coordenadas $07^{\circ} 49''$ de latitude Sul e $35^{\circ} 45''$ de longitude Oeste, e outra em Recife (bairro do Curado), coordenadas $08^{\circ} 03''$ de latitude Sul e $34^{\circ} 55''$ de longitude Oeste, ambas de propriedade do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, com dados publicados pela

extinta SUDENE. No período 1961-1983, funcionou uma estação do extinto Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA, em Carpina. Valores de evaporação média anual desta estação estão mostrados em Koffler et ali, apud Barragem do Carpina - Relatório da 1ª Etapa, CISAGRO / PE (1990). A Tabela 4.14 apresenta dados de evaporação média mensal para estas estações.

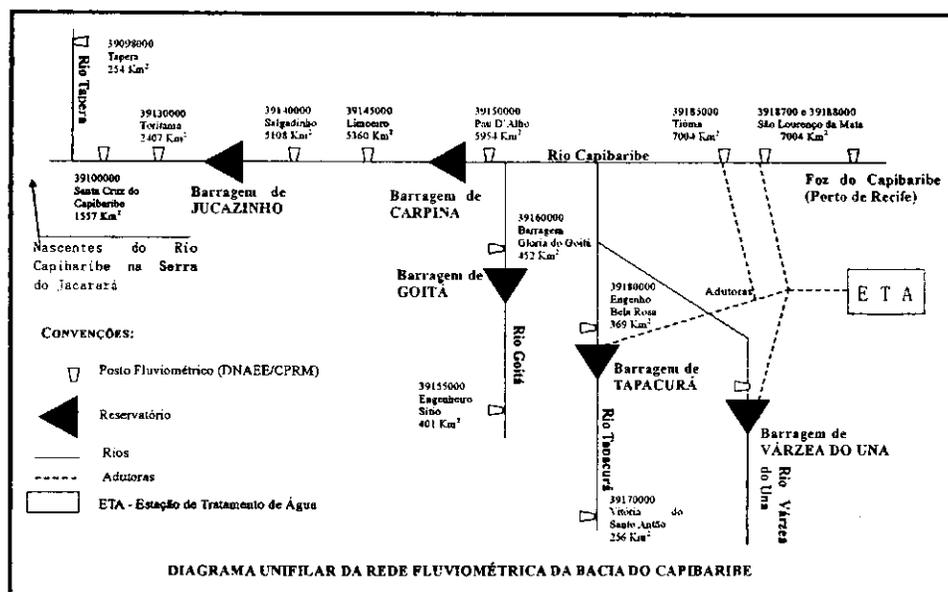


Figura 4.20 - Diagrama Unifilar da rede fluviométrica da bacia do Capibaribe

Tabela 4.14 – Evaporação média mensal registrada em estações da bacia do Capibaribe

Mês	Evaporação medida em Tanque Classe A (mm)		
	Estação		
	Recife (INMET)	Carpina (IAA)	Surubim (INMET)
Janeiro	176	208	231
Fevereiro	147	171	209
Março	144	167	200
Abril	122	147	173
Maio	118	117	141
Junho	114	107	114
Julho	114	110	123
Agosto	130	131	156
Setembro	140	157	153
Outubro	165	183	215
Novembro	170	203	222
Dezembro	173	198	217
Anual	1.713	1.899	2.154

A Secretaria de Ciência Tecnologia e Meio Ambiente – SECTMA-PE, tem reunido esforços no sentido de dotar Pernambuco com estações meteorológicas automáticas, para a coleta de dados em tempo real, visando à melhoria do monitoramento e dos modelos de

previsão do tempo, e para atualizar o seu banco de dados climatológicos, com vistas a uma melhor definição do clima no Estado. As estações meteorológicas automáticas monitoram os seguintes parâmetros: temperatura, umidade, radiação, direção e velocidade do vento e precipitação. Na bacia do rio Capibaribe já opera, desde meados de 1996, em Recife, uma dessas estações automáticas, localizada na sede da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária – IPA, no bairro do Bongí.

4.3.11 - O SISTEMA PRODUTIVO

Na parte baixa da bacia, inserida nas Zonas da Mata e Litoral, acha-se localizada a cidade de Recife, pólo concentrador de grande parte da população e de grandes distritos industriais do Estado. Possui economia basicamente urbana, com predomínio das atividades terciárias e secundárias, apresentando forte atividade de apoio à indústria do turismo. A atividade agrícola nessa região, tradicionalmente, é dominada pelo cultivo da cana-de-açúcar, em sistema de monocultura, praticado em solos predominantemente arenosos, nos tabuleiros e nos terraços litorâneos, e em solos rasos e com afloramentos rochosos, nos terrenos cristalinos da extremidade ocidental da área. A exploração de outras culturas é feita em menor escala, dado não se levar em conta estudos pedológicos e técnicas racionais de manejo do solo, provocando uma série de problemas ecológicos que contribuem para a queda da qualidade de vida da população.

Na Região Metropolitana do Recife, fora da bacia do Capibaribe, destaca-se o Complexo Industrial Portuário de SUAPE que representa, atualmente, o principal pólo indutor de todo o processo de desenvolvimento do Estado de Pernambuco. Na parte Agreste da bacia do Capibaribe, o perfil produtivo é baseado na agricultura e na pecuária extensiva, apresentando pouca disponibilidade de tecnologia nos sistemas de produção, baixa produtividade, não sendo capaz de reter mão-de-obra, criar e redistribuir renda. A agricultura, caracterizando-se como tradicional e restrita, está bastante distanciada do processo interativo que envolve os três agregados que constituem o hoje chamado “agronegócio”, isto é: os insumos, a produção agrícola e o processamento/distribuição dos produtos agrícolas.

A agroindústria no Agreste limita-se ao processamento primário. As propriedades agrícolas são do tipo tradicional, insuficientes e inadequadas a um complexo agroindustrial, com estrutura polarizada por minifúndios e latifúndios por exploração, inexistindo, na prática, a empresa rural. As culturas mais exploradas na região são, entre outras, a palma forrageira; a mandioca; o milho em grão; o feijão em grão; a laranja; a batata-inglesa; tomate; cenoura;

banana. Nas áreas de brejos de altitude, como os municípios de Taquaritinga do Norte e Brejo da Madre de Deus, aparecem as culturas do café, abacaxi, abacate, manga, laranja e hortaliças. Na produção animal, as atividades de maior importância são a bovinocultura e a ovino-caprinocultura, seguindo-se a avicultura e a suinocultura.

O parque industrial é pequeno e concentrado nos municípios de Vitória de Santo Antão, Carpina, Santa Cruz do Capibaribe e Limoeiro. Limita-se a alguns recursos de produção de roupas, produtos minerais não metálicos, metalurgia, mecânica, madeira e mobiliário. No que diz respeito ao vestuário, os municípios de Santa Cruz do Capibaribe e Toritama especializaram-se na fabricação de roupas, existindo numerosas unidades de produção de médio e pequeno porte, e não formalizadas, que representam um nicho industrial de alta relevância para a melhoria de qualidade de vida da população, particularmente pela grande quantidade de emprego e, principalmente, pela redistribuição da renda gerada localmente.

Setores como o turismo, a fabricação de móveis populares, a avicultura, a floricultura e a exploração mineral (granitos), apresentam-se com boas possibilidades de expansão. O setor de serviços, incluindo transporte e comunicação, prestação de serviços de saúde e educação, atividades sociais, comércio, serviços bancários e administração pública, etc., apresenta-se, regra geral, ineficiente, concentrando-se os maiores estabelecimentos prestadores de serviços nos municípios de Santa Cruz do Capibaribe, Vitória de Santo Antão, Limoeiro e Carpina.

Os problemas referidos à região Agreste da bacia do rio Capibaribe são ainda interferidos por questões relacionadas com os recursos hídricos, como:

- (i) pequenas vazões e precária qualidade das águas subterrâneas, em razão da formação cristalina que domina a região;
- (ii) precária qualidade de grande parte das águas superficiais, em razão da ocorrência de manchas de solo com potencial para a salinização das águas e da operação deficiente dos reservatórios;
- (iii) pequenas possibilidades de irrigação, pela ausência de manchas expressivas de solos irrigáveis que justifiquem a irrigação em larga escala;
- (iv) poluição dos recursos hídricos por lançamentos de efluentes industriais e esgotos sanitários,
- (v) deficiência dos sistemas de abastecimento d'água, que não acompanham o crescimento das cidades.

5 METODOLOGIA E ESTRUTURAÇÃO DA MODELAGEM

5.1 - GENERALIDADES

No Capítulo 4, evidenciou-se que a bacia do Capibaribe apresenta clima variado, estando situada entre isoietas de 2.000 mm e 500 mm na área litorânea e no extremo oeste, respectivamente. Enquanto a área de drenagem do reservatório Várzea do Una está localizada numa região de clima úmido, as áreas de drenagem do Tapacurá e Goitá consideram uma região de clima subúmido. Já a sub-bacia que integra os reservatórios Jucazinho e Carpina, com área de drenagem equivalente a 78,7% da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, está inserida no Agreste pernambucano, região de clima semi-árido.

Na região de influência dos reservatórios existem problemas peculiares de déficit hídrico e fortes conflitos pelo uso da água - com destaque para os conflitos entre o abastecimento urbano e a irrigação - que são decorrentes, regra geral, de uma realidade onde a demanda é muito maior que a oferta para atender, satisfatoriamente, os diversos interesses. Os cinco reservatórios, agregados a perímetros de irrigação, formam um complexo sistema de recursos hídricos composto por dois reservatórios em série - Jucazinho e Carpina, e três em paralelo - Goitá, Tapacurá e Várzea do Una. Como o objetivo geral deste trabalho está voltado à busca de conhecimento para auxílio à tomada de decisão para operação integrada e a alocação ótima das águas deste sistema de recursos hídricos, quando sujeitos a múltiplos usos, impõe-se a necessidade de estudá-lo sob várias condições operacionais.

Seguindo a tendência atual das pesquisas sobre modelos para planejamento e operação de sistemas de reservatórios, a modelagem de um sistema hídrico deste porte, onde os múltiplos usos podem incluir benefícios específicos associados com o abastecimento humano, agricultura irrigada, piscicultura, regularização de vazões, etc., requer o uso de formulações de programação matemática para otimização da operação, podendo ser associada a aplicação de um modelo de simulação. Pela literatura consultada, ficou evidente não existir metodologia consagrada para o estudo da operação de sistemas de reservatórios. Isto ocorre principalmente porque as aplicações possíveis diferem sob vários aspectos, entre eles (Lima e Lanna, 2005): i) número de reservatórios e propósitos do uso da água; ii) intervalo de tempo da operação; e iii) o estágio de aplicação (planejamento, projeto ou operação).

Com foco na otimização da operação do sistema hídrico, buscou-se um modelo matemático que fosse, de preferência, flexível para poder incorporar / adaptar múltiplos usos

ou objetivos; custos e benefícios da água; análises, cenários ou definições de estratégias (e.g.: variabilidade de dados climatológicos, condições iniciais fixas, mudanças de metas quanto à irrigação, abastecimento humano, etc.); a consideração de itens de segurança (como minimização de cheias, conflitos) e capacidades (como limitações de ordem física), e a incorporação de não-linearidades intrínsecas do problema, processando restrições que levem em conta o desenvolvimento sustentável da região, com respeito à condição de renovação dos recursos naturais, aspectos ambientais, econômicos e sociais. Para a simulação da operação do sistema hídrico, considerando um esquema de aproveitamento das definições de políticas operacionais realizadas a partir do modelo de otimização, buscou-se um modelo que promovesse a sua operação integrada permitindo descrever, entender e analisar o seu desempenho.

Foram escolhidos para o estudo: o modelo ORNAP, versão 1.02 (Curi e Curi, 1999; 2001), que é um modelo de otimização baseado em técnicas de programação não-linear, e o modelo de simulação AcquaNet (inicialmente na Versão 3.07, de 2002, posteriormente na Versão 3.11.00, de 06/12/2005), que é baseado na técnica de modelagem em redes de fluxo, que representa uma interface renovada do modelo MODSIM (Labadie, 1988, e Labadie, et al., 1999). Para prover condições para a análise operacional dos reservatórios e perímetros irrigados, através do uso dos modelos de otimização e simulação, foi feita uma abordagem determinística - onde se imagina o futuro como conhecido, através de cenários de planejamento, como estão detalhados no Capítulo 7.

Para transformar os dados em informações relevantes à análise de desempenho do sistema hídrico, com base nos resultados da simulação, foram utilizados os conceitos e potencialidades dos índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade (Hashimoto et. al., 1982), importantes para o planejamento e gerenciamento de sistemas hídricos, uma vez que permitem determinar a relação entre totais retirados do sistema e as respectivas garantias, fundamentais para auxiliar no processo decisório. A qualidade global dos cenários idealizados, visando a seleção do melhor(es) dele (s), foi avaliada por um critério de sustentabilidade, no sentido de integrar os resultados obtidos para os índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade.

5.2 - OS MODELOS ADOTADOS NO ESTUDO

5.2.1 - O MODELO ORNAP

O ORNAP (Optimal Reservoir Network Analysis Program), é um programa de otimização que vem sendo continuamente aprimorado. Segundo Curi e Curi (2001), destina-se

a dar suporte a decisão com relação aos múltiplos usos dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. É baseado em técnicas de programação não linear, desenvolvido no ambiente MATLAB, visando maximizar múltiplos benefícios ou objetivos relativos aos múltiplos usos da água resultante da operação de um sistema de reservatórios.

O ORNAP foi projetado tendo como base na teoria de sistemas físicos (Kesavan, 1987, Vlack e Singal 1983, apud Curi e Curi, 2001), onde as informações físicas de cada elemento do sistema são fornecidas. O modelo matemático do sistema físico descrito pelo ORNAP é, segundo classificações de sistemas físicos, de natureza determinística, quando as incertezas dos parâmetros do sistema não são levadas em consideração, causal, quando as respostas do sistema no tempo t dependem do estado do sistema em instantes anteriores, e agrupados, quando tem suas propriedades físicas descritas por parâmetros locais. As variáveis trabalhadas pelo ORNAP são relacionadas aos elementos naturais (hidroclimáticos e hidroagrícolas) e artificiais (demandas, características físicas, parâmetros comerciais, etc.) pertinentes ao sistema hídrico em estudo, definindo-se para estes elementos quatro pontos básicos de entradas de dados: (i) os reservatórios, (ii) demandas de água para o abastecimento doméstico, (iii) calhas dos rios e (iv) perímetros de irrigação. A Figura 5.1 mostra uma configuração de um sistema hídrico em termos de componentes físicos para o ORNAP.

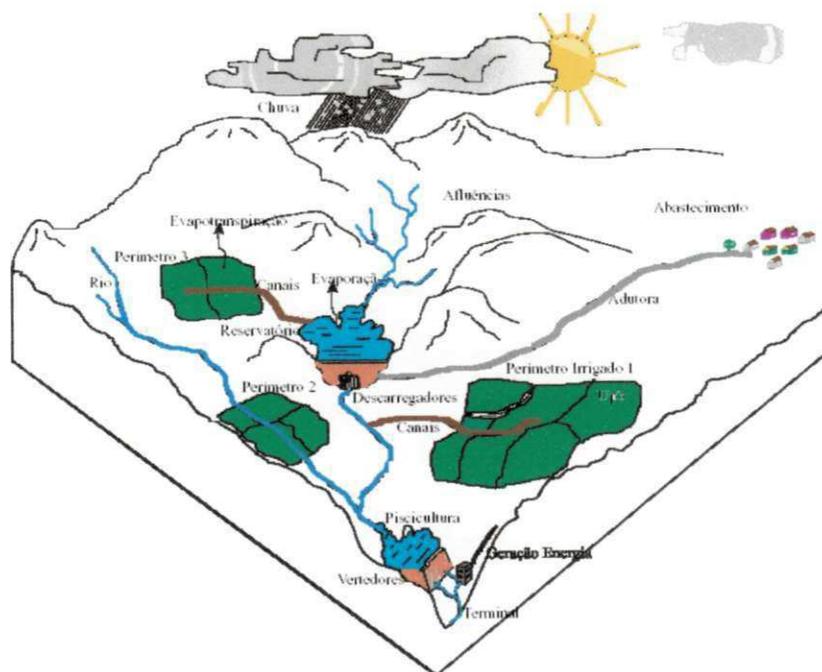


Figura 5.1 - Sistema físico representativo da aplicação do ORNAP.
(Fonte: Curi e Curi, 2001)

O ORNAP opera a nível mensal, para um período de doze meses, permitindo analisar o comportamento do sistema hídrico para diferentes cenários de planejamento. A função

objetivo especificada permite aferir o desempenho do modelo, estando sujeita a restrições diversas, representadas por equações de natureza linear e não linear, que traduzem, a nível mensal, limitações físicas dos reservatórios, perímetros e equipamentos hidráulicos, limitações hidrológicas, legais, econômicas e sociais, que são próprias de sistemas de múltiplos usos. Na seqüência estão apresentados, matematicamente, aspectos teóricos do modelo.

5.2.1.1 - DA AGRICULTURA IRRIGADA

O objetivo é calcular a receita líquida **RL** gerada pela escolha apropriada da dimensão de áreas irrigadas para cada tipo de cultura. Para isso, procura-se levar em consideração a renda bruta obtida com a venda dos produtos agrícolas, os custos de produção anuais, o custo da água de irrigação e a atualização monetária. A renda bruta anual Rb_{jt} em R\$/ano/cultura, pode ser dada pela equação:

$$Rb_{jt} = \sum_{k=1}^{n_i} Prod_{jt} * Prc_j * Ac_{jk} \quad (5.1)$$

onde,

j - indica o tipo de cultura, $j=1, \dots, n_c$;

t - indica o ano, $t=1, \dots, n_a$;

k - indica o perímetro irrigado, $k=1, \dots, n_i$;

n_i - número de perímetros irrigados;

n_c - número de culturas;

n_a - número de anos em estudo;

$Prod_{jt}$ - produtividade da cultura j por unidade de área no ano t de irrigação,

Prc_j - valor atualizado do preço de comercialização da cultura j e

Ac_{jk} - área plantada com a cultura j no perímetro k .

O custo de produção anual Cp_{jt} em R\$/ano/cultura, relativos aos gastos com insumos, mão de obra e máquinas, pode ser obtido por:

$$Cp_{jt} = \sum_{k=1}^{n_i} Cprod_{jt} * Ac_{jk} \quad (5.2)$$

onde,

$Cprod_{jt}$ - valor atualizado do custo de produção por unidade de área da cultura j referentes à gastos relativos ao ano t .

A taxa de evapotranspiração (Etp_{ijk}) mensal de uma cultura j no mês t no perímetro k , em mm/mês, pode ser estimada pelo chamado método do tanque evaporimétrico (Doorenbos e

Pruitt, 1997), que relaciona a taxa de evapotranspiração de referência ($E_{to_{kt}}$), no mês t no perímetro k , em mm/mês, pela seguinte fórmula:

$$E_{to_{kt}} = K_{Tk} * E_{V_{kt}} \quad (5.3)$$

onde,

t - indica o mês, $t=1, \dots, nm$ (número de meses em estudo);

K_{Tk} - coeficiente do tanque evaporimétrico no perímetro k , e

$E_{V_{kt}}$ - taxa de evaporação média mensal, em mm/mês, de um tanque evaporimétrico.

Logo, a evapotranspiração da cultura, no mês ($E_{tp_{jkt}}$), é obtida por:

$$E_{tp_{jkt}} = K_{c_{jt}} * E_{to_{kt}} \quad (5.4)$$

onde,

$K_{c_{jt}}$ - coeficiente de cultivo no mês t da cultura j .

Para a determinação da lâmina de irrigação, é necessário calcular, sob o ponto de vista agrônomico, a taxa da precipitação que infiltra no solo e efetivamente permanece à disposição das raízes da planta, isto é, a precipitação efetiva ($P_{ce_{kt}}$) no mês t no perímetro k , em mm/mês, na região a ser irrigada, que pode ser estimada a partir de especificação da FAO (Doorenbos e Pruitt, 1997), para terrenos com declividade de 4 a 5%:

$$P_{ce_{kt}} = 0,8 * P_{c_{kt}} - 25 \text{ se } P_{c_{kt}} \geq 75 \text{ mm} \quad (5.5)$$

ou

$$P_{ce_{kt}} = 0,6 * P_{c_{kt}} - 10 \text{ se } P_{c_{kt}} < 75 \text{ mm} \quad (5.6)$$

onde, $P_{c_{kt}}$ é taxa de precipitação no mês t em mm/mês que ocorre no perímetro k .

A necessidade de irrigação líquida da cultura j , no mês t , cultivada no perímetro k , ($N_{l_{jkt}}$), ou a lâmina de rega suplementar que a planta necessita para cada intervalo de tempo do seu ciclo vegetativo, pode ser determinada por (Gomes, 1999):

$$N_{l_{jkt}} = E_{tp_{jkt}} - P_{ce_{kt}} - G_{jkt} - W_{kt} \quad (5.7)$$

onde,

G_{jkt} - dotação de água à zona radicular da cultura j no mês t por capilaridade em mm que depende do tipo de solo e do nível do lençol freático do perímetro k , e

W_{kt} - reserva de água no solo no início do mês t em mm, que depende da capacidade de armazenamento de água no solo no perímetro k .

(*) Neste trabalho, G_{jkt} e W_{kt} foram considerados iguais a zero.

A quantidade de água a ser aduzida para cada cultura j dependerá da eficiência do sistema de irrigação ($E_{irr_{jk}}$), obtida do produto entre a eficiência do sistema de distribuição de

água para cada perímetro ($Esis_{jk}$) e da eficiência da aplicação da irrigação por cultura, ($Eapl_j$), dada por:

$$Eirr_{jk} = Eapl_j * Esis_{jk} \quad (5.8)$$

e da necessidade de lixiviação dos sais que se acumulam no solo cultivado, obtida em função da fração de água mínima (LR_{jkt}), que deve percolar para lavar esses sais, que depende da qualidade da água de irrigação e da salinidade tolerada pela cultura j no perímetro k no mês t .

Equações para se determinar LR_{jkt} para os casos de irrigação por inundação e por aspersão de baixa frequência, e para irrigações de alta frequência (gotejamento e microaspersão), são propostas por Rhoades e Merrill, citados por Gomes (1999). Nesse trabalho, não se dispondo de dados sobre a condutividade elétrica do extrato do solo saturado de cada perímetro, não foram avaliadas dotações para água de lixiviação.

A lâmina mensal de água para a irrigação da cultura j no mês t para o perímetro k , ($Qirr_{jkt}$), transformada em vazão por unidade de área, a ser fornecida pelo sistema, pode ser obtida por:

$$Qirr_{jkt} = \frac{Nl_{jkt}}{(1 - LR_{jkt}) * Eirr_{jk}} \quad (5.9)$$

O custo da água anual, Ca_{jt} em R\$/ano/cultura, aduzida para os perímetros pode ser obtida por:

$$Ca_{jt} = \sum_{k=1}^{ni} \sum_{i=12*(t-1)+1}^{12*(t-1)+12 \leq nm} Pra_k * Qirr_{ijk} * AC_{jk} \quad (5.10)$$

onde,

Pra_k - preço da água por unidade de volume, aduzida para o perímetro k .

Portanto, a receita líquida total, **RL** em R\$, é dada pela expressão:

$$RL = \sum_{t=1}^{na} \prod_{l=1}^t (1 + d_l) \sum_{j=1}^{nc} \left[\prod_{m=1}^t (1 + dc_{jl}) * Rb_{jt} - Cp_{jt} - Ca_{jt} \right] \quad (5.11)$$

onde,

$\sum_{l=1}^t \prod (1 + d_l)$ - representa o fator de atualização monetária referente à taxa de desvalorização d_l da moeda l no ano l ; e

$\sum_{l=1}^t \prod (1 + dc_{jl})$ - representa fator de atualização monetária referente à expectativa de crescimento ou decréscimo nos preços dc_{jl} , além do nível de inflação, da cultura j no ano l , que pode ser positiva ou negativa.

Os gastos fixos e indiretos dos produtores (administração, taxas, etc.), embora não alterem o resultado do processo de otimização, podem ser diluídos na formação do preço de produção das culturas.

Outros aspectos da agricultura irrigada estão relacionados com as restrições físicas e operacionais do sistema. Entre as restrições físicas pode-se destacar: a área a ser irrigada em cada perímetro, a vazão a ser aduzida para o perímetro e a não negatividade das variáveis. Entre as restrições operacionais, relacionam-se: os critérios agronômicos e de mercado.

A limitação imposta pela capacidade do canal ou adutora pela qual a água é aduzida aos perímetros irrigados, pode ser representada por:

$$\sum_{j=1}^{nc} Q_{irr_{jkt}} * A_{c_{jk}} \leq Q_{tmax_k} \quad (5.12)$$

onde,

Q_{tmax_k} - é capacidade máxima mensal de vazão da adutora ou canal para o perímetro k .

A restrição quanto ao limite máximo mensal da área que pode ser plantada por perímetro em cada mês, pode ser expressa por:

$$\sum_{j=1}^{nc} \alpha_{jkt} * A_{c_{jk}} \leq A_{pmax_{kt}} \quad (5.13)$$

onde,

$\alpha_{jkt} = 1$ se a cultura j é plantada no mês t no perímetro k , ou

$\alpha_{jkt} = 0$ se a cultura j não é plantada no mês t no perímetro k , e

$A_{pmax_{kt}}$ - é o limite máximo de área total que pode ser plantada por perímetro no mês t .

Com relação aos critérios agronômicos e de mercado, o conjunto de restrições se refere aos limites mínimos e máximos de áreas plantadas com cada tipo de cultura por perímetro irrigado, e podem ser expressas por:

$$A_{\text{min}_{jk}} \leq A_{c_{jk}} \leq A_{\text{max}_{jk}} \quad (5.14)$$

onde;

$A_{\text{min}_{jk}}$ – área mínima plantada com a cultura j no perímetro k

$A_{\text{max}_{jk}}$ - área máxima plantada com a cultura j no perímetro k.

5.2.1.2 - DOS RESERVATÓRIOS E SEUS COMPONENTES

No modelo ORNAP, os reservatórios podem ser conectados, via pontos de conexão denominados nós do sistema, a outros elementos, a jusante destes, como descargas de fundo, vertedouros e tomadas d'água. A vazão em cada um destes elementos depende de seus parâmetros hidráulicos e do nível de água nos reservatórios. O reservatório também poderá ser conectado a um nó a montante que venha a receber vazões afluentes. O balanço hídrico mensal de cada reservatório, baseado no princípio de conservação da massa, pode ser expresso pela seguinte equação:

$$V_{r_{l,t+1}} = V_{r_{l,t}} + \sum_{\alpha(l)} Q_{a_{\alpha(l),t}} - \sum_{f(l)} Q_{f_{f(l),t}} - \sum_{t(l)} Q_{t_{t(l),t}} + (Pr_{l,t} - Ev_{r_{l,t}}) * Ar_{l,t} - \sum_{v(l)} Q_{v_{v(l),t}} \quad (5.15)$$

onde,

- $\alpha(l)$ - índice que representa a α -ézima vazão afluente ao reservatório l;
- $f(l)$ - índice que representa o f-ézimo descarregador de fundo do reservatório l;
- $t(l)$ - índice que representa a t-ézima tomada de água do reservatório l;
- $v(l)$ - índice que representa o v-ézimo vertedouro do reservatório l;
- $V_{r_{l,t}}$ - volume do reservatório l no mês t;
- $V_{r_{l,t+1}}$ - volume do reservatório l no mês t+1;
- $Q_{a_{\alpha(l),t}}$ - α -ézima vazão afluente ao reservatório l no mês t;
- $Q_{f_{f(l),t}}$ - f-ézima vazão de descarga de fundo do reservatório l no mês t;
- $Q_{t_{t(l),t}}$ - t-ézima vazão de tomada d'água do reservatório l no mês t;
- $Pr_{l,t}$ - precipitação direta no reservatório l no mês t;
- $Ev_{r_{l,t}}$ - taxa de evaporação sobre o reservatório l no mês t,
- $Ar_{l,t}$ - área média do espelho d'água do reservatório l no mês t e
- $Q_{v_{v(l),t}}$ - e-ézimo volume vertido do reservatório l no mês t.

Dependendo das vazões afluentes e alocação mensal de água do reservatório para os diversos usos, as áreas da superfície líquida, as cotas do nível de água e os volumes mensais do reservatório variam de mês a mês sendo, portanto, necessário atualizá-las mensalmente. Para isso se faz uso das relações cota x área x volume para cada reservatório envolvido no estudo. A vazão a ser aduzida através das tomadas d'água está limitada a sua capacidade máxima e à cota da tomada d'água, descrito, matematicamente, por:

$$0 \leq Q_{t(i),t} \leq Q_{tmax(i)}; \quad (5.16)$$

$$Q_{t(i),t} \geq 0 \text{ se } H_{r_{it}} \geq H_{t(i)} \quad (5.17)$$

onde, $Q_{tmax(i)}$ - vazão máxima de adução pela t-ézima tomada d'água do reservatório i; $H_{r_{it}}$ - cota do nível d'água do reservatório i no mês t; $H_{t(i)}$ - cota da t-ézima tomada d'água no reservatório i,

A vazão a ser liberada por descarregadores de fundo está limitada pela sua capacidade máxima no mês t, sendo estimada pela equação abaixo (Quintela,1981):

$$0 \leq Q_{f(i),t} \leq C_{f(i)} * A_{f(i)} * (2 * g * (H_{r_{it}} - H_{f(i)}))^{0,5} \quad (5.18)$$

onde,

$C_{f(i)}$ - coeficiente de vazão do f-ézimo descarregador de fundo do reservatório i;

$Q_{f(i),t}$ - vazão máxima que pode ser aduzida pelo f-ézimo descarregador de fundo do reservatório i no mês t;

$A_{f(i)}$ - área da seção transversal do f-ézimo descarregador de fundo do reservatório i;

$H_{f(i)}$ - cota de jusante da geratriz inferior do f-ézimo descarregador de fundo do reservatório i.

As vazões extravasadas pelos vertedouros são estimadas, segundo Quintela (1981), pela equação:

$$Q_{v(i)t} = C_{v(i)} * B_{v(i)} * (H_{r_{it}} - H_{vert(v(i))})^{1,5} \quad (5.19)$$

onde,

$C_{v(i)}$ - coeficiente de descarga dependente da forma do v-ézimo vertedor do reservatório i.

$B_{v(i)}$ - largura de base do v-ézimo vertedouro do reservatório i e

$H_{vert(v(i))}$ - cota da soleira do v-ézimo vertedouro do reservatório i.

As vazões vertidas serão verificadas se, e somente se, a condição abaixo for satisfeita:

$$H_{vert(v(i))} \leq H_{r_{it}} \leq H_{vmax(v(i))} \quad (5.20)$$

onde,

$H_{vmax(v(i))}$ - representa a cota do nível d'água do reservatório i que gera a lâmina vertente máxima projetada para o v-ézimo vertedouro.

Outras restrições podem ser impostas ao sistema, como:

(i) de ordem física

$$V_{r_{morte(i)}} \leq V_{r_{it}} \leq V_{r_{max(i)}} \quad (5.21)$$

(ii) de ordem operacional

$$V_{r_{min_{it}}} \leq V_{r_{it}} \leq V_{r_{max_{it}}} \quad (5.22)$$

onde,

$V_{r_{morte}(l)}$ - representa o volume morto do reservatório l;

$V_{r_{max}(l)}$ - representa a capacidade máxima do reservatório l;

$V_{r_{max}lt}$ - representa o volume máximo admitido para o reservatório l no mês t, e

$V_{r_{min}lt}$ - representa o volume mínimo admitido para o reservatório l no mês t.

5.2.1.3 - DE OUTROS COMPONENTES DO SISTEMA

Dentre outros componentes do sistema hídrico, para o ORNAP, estão as calhas dos rios, cujas vazões podem ser limitadas por valores inferiores, indicando requerimentos de regularizações e de vazões ecológicas, ou ainda superiores, como para o controle de cheias, descritas pela expressão:

$$Q_{c_{min}ct} \leq Q_{c_{ct}} \leq Q_{c_{max}ct} \quad (5.23)$$

onde:

c - índice que indica a calha (trecho) de rio;

$Q_{c_{min}ct}$ - vazão mínima na c-ézima calha de rio no mês t,

$Q_{c_{ct}}$ - vazão na c-ézima calha do rio no mês t, e

$Q_{c_{max}ct}$ - vazão máxima na c-ézima calha de rio no mês t.

O ORNAP promove ainda o balanço hídrico em cada nó do sistema, como segue:

$$\sum_i Q_{entra_{in,t}} = \sum_j Q_{sai_{jn,t}} \quad (5.24)$$

onde:

$Q_{entra_{in,t}}$ - representa a i-ézima vazão de entrada no nó n, no mês t, e

$Q_{sai_{jn,t}}$ - representa a j-ézima vazão de saída do nó n, no mês t.

A receita líquida (RI) oriunda da piscicultura no reservatório pode ser estimada por:

$$RI = (Prmp_l * Pdp_l - Cal) * (\min_t Ar_{lt}) \quad (5.25)$$

onde:

$Prmp_l$ - preço médio do pescado na região do reservatório l;

Pdp_l - produtividade média de pescado por unidade de área,

Cal - custo de alevinagem por unidade de área e

$\min_t Ar_{lt}$ - área da superfície líquida mínima, entre os meses t de despesca, no reservatório l.

5.2.1.4 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO

O ORNAP tem a seguinte estrutura computacional: um programa principal, *Otimiz*, responsável pela otimização via MATLAB, apoiando-se em informações de seis arquivos, num trabalho iterativo, sendo eles: o arquivo *dados*, contendo valores para as variáveis

operacionais do sistema; o *balhid*, com a função balanço hídrico mensal dos reservatórios; o *cotvol*, que opera entradas de volumes mensais e sai com as cotas dos níveis d'água mensais dos reservatórios; o *espcot*, que opera entradas de cotas de níveis d'água mensais e gera áreas de espelhos d'água mensais para os reservatórios; o *irrig*, responsável pelas avaliações agronômicas e econômicas da irrigação, a nível mensal, e o *penal*, com as funções de penalidade aplicáveis à minimização da função objetivo, observadas as restrições impostas. O arquivos *printarq* e *printarqi* operam a impressão dos resultados da otimização, seja em forma de solução final ou como solução imediatamente anterior, respectivamente, completado, ou não, o número de iterações de minimização programadas para a execução do algoritmo.

A análise da convergência do processo de otimização é feita através de cálculos para a função objetivo e função de penalidade que, para uma boa aceitação, devem ser iguais ou da mesma ordem de grandeza, sendo avaliados ainda:

- o erro relativo na função objetivo (fo), dado por: $\text{erro}_{fo} = |(fo_t - fo_{t-1}) / fo_t|$;
- o erro relativo na função de penalidade (fp), dado por: $\text{erro}_{fp} = |(fp_t - fp_{t-1}) / fp_t|$ e
- o erro relativo na função mista (fm), dado por: $\text{erro}_{fm} = |(fp_t - fo_t) / fo_t|$,

Estes valores devem respeitar um nível de tolerância (tol) especificado. No presente trabalho, analisa-se tolerância da ordem de 10^{-5} . O programa fornece ainda resultados para análise da convergência de restrições, dentro da tolerância requerida, descrevendo o tipo de restrição violada, ou não, suas quantidades mensais e valores totais, seja em vazões, volumes, níveis e áreas. O fluxograma do modelo ORNAP está apresentado na Figura 5.2.

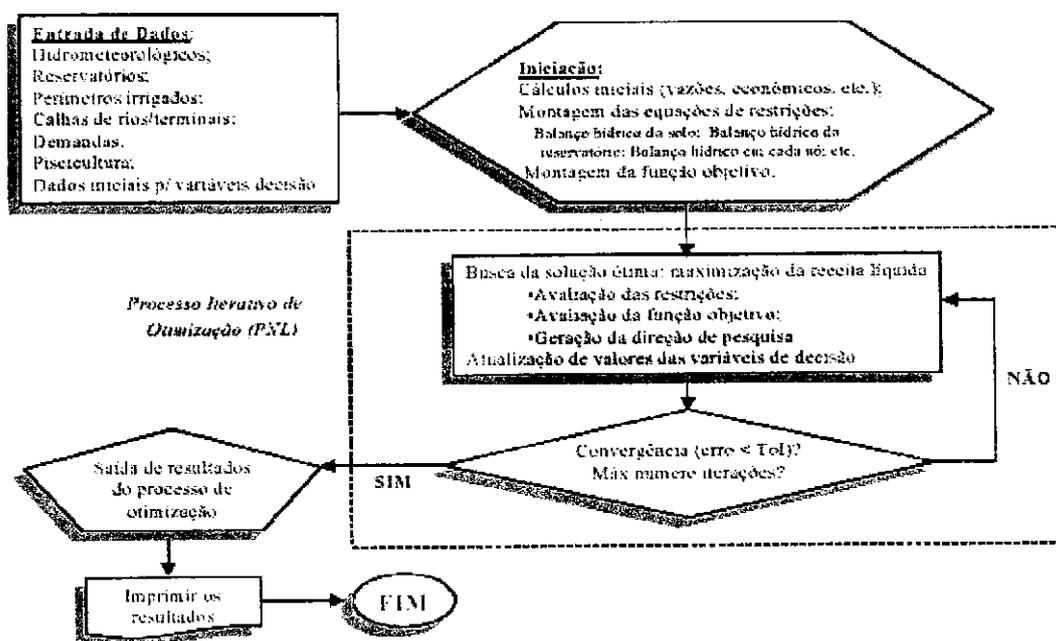


Figura 5.2 - Fluxograma de funcionamento do modelo ORNAP.

5.2.2 - O MODELO DE REDE DE FLUXO MODSIM /ACQUANET

Os modelos de rede de fluxo representam um sistema de recursos hídricos em bacias hidrográficas como uma rede formada de "nós" e "arcos", como apresentado na Figura 5.3 (Labadie et al., 1999). Os nós, que têm um limite superior e um inferior (e.g.: níveis mínimos e máximos de represas) podem representar reservatórios, demandas de cidades, de indústrias e da agricultura, dentre outros pontos importantes do sistema; os arcos, ou elos, são as conexões entre os nós formados por adutoras, canais, túneis e trechos naturais ou artificiais de rios, tendo cada um deles um limite inferior e um superior (ex.: vazões mínimas e máximas de transferência), e um custo de passagem fixado pelo usuário. O modelo de simulação MODSIM, do tipo rede de fluxo pura, foi, originalmente, desenvolvido na Colorado State University, por Jonh W. Labadie, em 1988.

A partir de junho/2002, para se diferenciar da versão original MODSIM, o Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões - LabSid, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, desenvolveu a interface gráfica batizada de AcquaNet, atualmente na versão Versão 3.11.00, com última atualização em 06/12/2005.

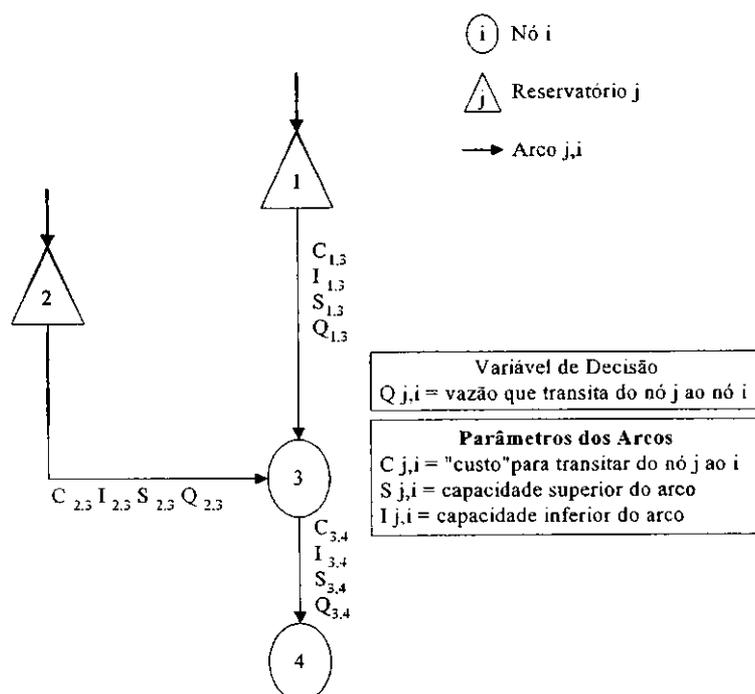


Figura 5.3 - Representação de um sistema como uma rede de fluxo

O AcquaNet dispõe de diferentes módulos operacionais, como: i) um módulo de diálogo, que permite que toda a topologia do problema seja formulada apenas com a utilização do mouse e de uma série de ícones que representam reservatórios, canais, nós de

passagem, etc.; ii) um módulo de alocação de água, que constitui um modelo de rede de fluxo de caráter geral e adaptável a diversos tipos de problemas, podendo representar a maior parte das configurações e estruturas operacionais das bacias hidrográficas por meio de especificações de dados de entrada apropriados; iii) um módulo de qualidade de água, que pode simular a salinidade em rios e em reservatórios; iv) o módulo de energia, que pode simular a produção de energia em aproveitamentos hidrelétricos; v) um módulo de irrigação e um módulo de análise econômica para alocação (Porto et al., 2004).

Para os propósitos deste estudo foi mobilizado apenas os recursos do módulo de alocação de água do AcquaNet, que pode fornecer subsídios para gerar planos operacionais e diretrizes gerenciais para uma bacia hidrográfica a fim de satisfazer metas, prioridades e limitações específicas. Seus atributos mais importantes, são:

- i) faz uma simulação em rede de fluxo de volumes de água armazenados em reservatórios e da distribuição de vazões de sistemas de recurso hídricos, inclusive a operação de reservatórios em intervalos de tempo mensal;
- ii) inclui a capacidade de otimizar a operação do sistema mediante o algoritmo “Out-of-Kilter”, essencialmente um algoritmo de programação linear primal-dual que foi desenvolvido para a solução eficiente de problemas de minimização de custo em redes (os custos, neste caso, não precisam ser custos econômicos, mas podem ser fatores prioritários ou de ponderação que sirvam para colocar as alternativas operacionais em forma de prioridade);
- iii) pode ser usado para formulação de diretrizes operacionais de curto prazo (semanalmente) ou de longo prazo (sazonal ou mensal), onde a otimização da rede para atender as metas operacionais na verdade é executada de forma seqüencial, e não por um processo plenamente dinâmico;
- iv) a operação de reservatórios é feita utilizando-se o conceito de volume meta (ou nível meta), ao qual se atribui uma prioridade;
- v) a evaporação nos reservatórios é computada por meio de um processo iterativo implícito que faz estimativas sucessivas da área média da superfície do espelho d’água durante o intervalo de tempo adotado (semana ou mês);

É importante realçar que o AcquaNet, essencialmente, é um modelo de simulação capaz de efetuar uma série de otimizações estáticas, a cada intervalo de discretização (um dado mês, por exemplo), que garante o ótimo global para a forma como o sistema é representado e na otimização daquele mês. Desta forma, ele pode ser considerado como um modelo míope, isto é, o modelo não “enxerga o futuro”. Para uma análise a nível mensal, por exemplo, ocorre a

otimização da alocação de água havendo transferência de dados de um determinado mês para o mês seguinte, ou seja, todas as otimizações mensais são conectadas ocorrendo de fato uma simulação da operação do sistema.

5.2.2.1 - ASPECTOS TEÓRICOS

O princípio básico para utilização do AcquaNet é que o sistema físico possa ser representado como uma rede de fluxo “capacitada” ou seja, que existam limites restritos em cada arco e a satisfação do equilíbrio de massa em cada nó. Cada arco deve ser unidirecional no que diz respeito ao sentido do fluxo e a otimização da operação do sistema se dá mediante o algoritmo “Out-of-Kilter”, cuja descrição está apresentada em Elmagharaby (1970), entre outros. Matematicamente, com base neste algoritmo, o problema de custo mínimo da rede é resolvido pelo modelo com base nas seguintes expressões:

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot Q_{ij} \quad (5.26)$$

sujeita a

$$\sum Q_{ij} - \sum Q_{ji} = 0 \quad (5.27)$$

para cada nó e

$$I_{ij} \leq Q_{ij} \leq S_{ij} \quad (5.28)$$

para cada arco, onde,

C_{ij} - é o custo por unidade de fluxo que passa pelo arco (ou uma prioridade operacional);

Q_{ij} - é a vazão média que transita do nó i ao nó j , no intervalo de tempo considerado;

I_{ij} - é o limite inferior do fluxo que passa pelo arco (e. g.: a capacidade mínima do arco);

S_{ij} - é o limite superior do fluxo que passa pelo arco (e. g.: a capacidade máxima do arco);

A equação (5.26) é a função objetivo e representa o custo total da rede. A restrição representada pela equação (5.27) estabelece que a rede deve ser totalmente conservativa, ou seja, a soma das vazões que chega em algum nó deve ser exatamente igual à soma das vazões que saem deste mesmo nó. Já a restrição representada pela equação (5.28) determina que o fluxo que passa por cada arco deve estar sempre limitado pelas capacidades máxima e mínima deste arco.

A não linearidade desse problema resulta do fato de que $C_{ij}(Q_{ij})$, $I_{ij}(Q_{ij})$ e $S_{ij}(Q_{ij})$ podem ser funções não lineares de Q_{ij} no sentido geral. Para resolver isso, o modelo automaticamente desempenha as seguintes iterações em cada intervalo de tempo durante a simulação:

- (i) inicialmente assume valores para C_{ij} , I_{ij} e S_{ij} e resolve a rede;
- (ii) atualiza os valores C_{ij} , I_{ij} e S_{ij} com base nas vazões Q_{ij} ;
- (iii) resolve novamente a rede com os parâmetros atualizados e obtém novos valores para as vazões Q_{ij} , e
- (iv) repete o procedimento até que as estimativas sucessivas de vazões converjam dentro de alguma tolerância de erro preestabelecida ou pré-definida pelo usuário, repetindo-se o processo para os intervalos de tempo subsequentes.

Para determinação da solução do problema, o modelo AcquaNet considera três critérios de otimização do algoritmo “Out-of-Kilter”, a saber:

- (i) se $C_{ij}(Q_{ij}) < 0$, então $Q_{ij} = I_{ij}$, se ocorrer perdas no transporte de i para j , o fluxo deve ser o menor possível;
- (ii) se $C_{ij}(Q_{ij}) > 0$, então $Q_{ij} = S_{ij}$, se ocorrer ganhos no transporte de i para j , o fluxo deve ser o maior possível, e
- (iii) se $C_{ij}(Q_{ij}) = 0$, então $I_{ij} \leq Q_{ij} \leq S_{ij}$, se o custo ligado no arco for igual a zero, a situação é indiferente, desde que não haja violação dos limites mínimos e máximos.

Qualquer arco que satisfaça uma das condições acima é considerado “em Kilter” e o modelo define como uma solução ótima para o problema. Arcos que não satisfazem uma dessas condições são chamados de “fora de Kilter”. Por sua vez, os custos podem significar também prioridades, haja vista que existe a seguinte relação entre custo (C) e prioridade (P), onde C_{ij} representa o custo da transferência da unidade entre o nó i e nó j :

$$C_{ij} = - (1000 - P * 10) \quad (5.29)$$

Assim, a escala de prioridades é decrescente, ou seja, a maior prioridade equivale a 1 e a menor, 99. Portanto, ao atender uma prioridade o modelo estará diminuindo os custos da rede de um valor C por unidade de vazão fornecida. Assim, o valor absoluto do custo (ou prioridade) não é importante, mas sim seu valor relativo em comparação aos demais elementos. Um sumário sobre limites de arcos e seus respectivos “custos” unitários (ou prioridades) é apresentado na Tabela 5.1.

Outras particularidades sobre o AcquaNet, como componentes do sistema hídrico; entrada de dados; vazões não reguladas (podem ser baseadas em séries históricas, previsões

ou geração sintética); vertimentos; estados hidrológicos para os reservatórios; opções de cálculo, etc, não estão detalhadas neste estudo posto que estão amplamente descritas no manual “AcquaNet - Modelo para Alocação de Água em Sistemas Complexos de Recursos Hídricos - Manual do Usuário”, disponível em área pública na página do LabSid/USP, podendo ser complementado pelas instruções contidas no trabalho “MODSIM - Modelo de Rede de Fluxo para Simulação de Bacias Hidrográficas - Manual do Usuário e Estudos de Casos” (Labadie et al., 1999).

Tabela 5.1 – Tipos de arcos e respectivos limites inferiores, limites superiores e custos.

Tipo de arco	Limite inferior	Limite superior	Custo unitário
<u>Arcos do sistema físico:</u>			
- Trecho do rio	Zero ou vazão mínima aceitável ¹	Capacidade do rio ¹	Zero ou penalidade ¹
- Canais	Zero ou requisito mínimo	Capacidade canal ¹	Zero ou penalidade ¹
<u>Arcos artificiais:</u>			
- Volume e vazão afluente inicial	Vol. remanescente ao final do período anterior, mais a vazão no período atual, mais fluxo de retorno, mais importações, etc.	Igual ao limite superior	Zero.
- Volume meta	Volume mínimo do reservatório ¹	Volume meta ¹	- (1.000 - P _i) ²
- Demanda	Zero	Demanda no nó mais perda de canal dos arcos que entram no nó.	- (1.000 - DEMR _i) ³
- Vertimento	Zero	Soma de todas as capacidades dos reservatórios multiplicada por dez.	Prioridade de reservatório multiplicada por 10.000 ¹
<u>Arcos de equilíbrio de massa:</u>			
- Volume e influxo inicial total	Soma dos limites inferiores nos arcos de armazenamento e de influxo iniciais	Igual ao limite inferior	Zero
Volume final total	Soma das armazenagens mínimas	Soma das capacidades máximas de armazenamento	Zero
Demanda total	Zero	Soma das demandas e das perdas de canal	Zero

¹ Especificado pelo usuário; ² P_i - Prioridades especificadas pelo usuário (entre 1 a 99) para volume no nó i;

³ DEMR_i - Prioridades especificadas pelo usuário (entre 1 a 99) para a demanda no nó i.

5.3 - ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA HÍDRICO PARA A MODELAGEM

Como dito anteriormente, a concepção metodológica adotada foi a de utilização conjunta de modelo de otimização não-linear e de um modelo simulação, para análise da operação do sistema hídrico. Apresenta-se a seguir, a estratégia operacional desenvolvida na aplicação e integralização dos modelos ORNAP e AcquaNet.

5.3.1 – ESTRUTURAÇÃO PARA O ORNAP

A aplicação do ORNAP foi realizada em duas etapas distintas, estruturando-se a configuração do sistema hídrico em dois sub-sistemas: o sub-sistema Jucazinho - Carpina e o sub-sistema Tapacurá - Goitá - Várzea do Una. Na primeira etapa, o modelo foi utilizado para analisar o sub-sistema formado pelos reservatórios, em série, Jucazinho e Carpina, e perímetros irrigados, como representado na Figura 5.4. Nesta configuração, as variáveis de decisão são as vazões mensais regularizados por cada reservatório e as áreas das culturas que geram maior receita líquida, por perímetro irrigado, sendo obrigatório o atendimento das demandas do abastecimento doméstico.

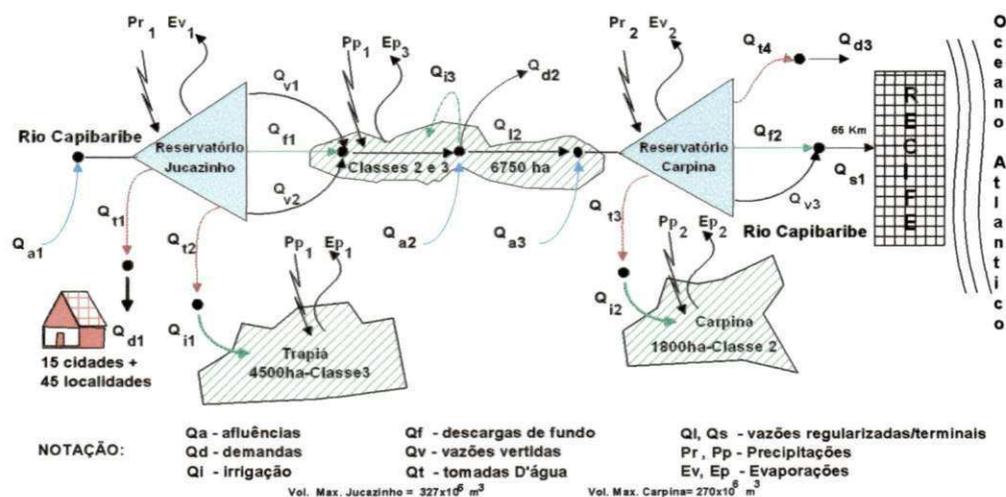


Figura 5.4 - Configuração do sub-sistema Jucazinho-Carpina para o ORNAP.

Numa segunda etapa, aproveitando elementos estudados por Barbosa et al. (2001), analisa-se o sub-sistema formado pelos reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, em paralelo, e três perímetros irrigados, conforme a representação operacional ilustrada na Figura 5.5. Nesta configuração as variáveis de decisão, além de áreas das culturas que geram maior receita líquida em cada perímetro irrigado, passam pelas vazões mensais dos reservatórios Tapacurá e Várzea do Una para a Estação de Tratamento de Água (ETA), contemplando vazões mensais regularizadas por cada reservatório.

Em todas as configurações idealizadas para a aplicação do modelo ORNAP, seja para o sub-sistema Jucazinho - Carpina (Figura 5.4) ou para o sub-sistema Tapacurá - Goitá - Várzea do Una (Figuras 5.5), estão indicadas as posições dos reservatórios e perímetros de irrigação; as variáveis que identificam as entradas e saídas de água, os pontos de conexão (nós) entre os reservatórios e os demais elementos, seja a montante ou a jusante. Como a função objetivo do

de água. Na estruturação do sistema hídrico, uma hipótese básica é verificar a disponibilidade hídrica superficial dos sistemas produtores, quando operando numa configuração integrada, resguardando-se as restrições de interligações e de transferência de água entre eles, visando o atendimento dos diversos usos da água, incluindo o aporte de vazões adicionais para reforço do abastecimento público da RMR.

O AcquaNet permite uma representação de um sistema hídrico e de seu comportamento operacional, sendo necessário que exista segurança do operador tanto para a criação da topologia quanto para adoção das prioridades, o que só é possível com o conhecimento da rede em estudo e suas particularidades. Isso foi reconhecido na etapa de modelagem do sistema para aplicação do ORNAP. Para a simulação pelo AcquaNet, o sistema hídrico formado pelos cinco reservatórios, perímetros de irrigação, localidades abastecidas, etc., apresenta topologia composta de vinte e um (21) nós e vinte (20) arcos, conforme ilustra a Figura 5.6, para o quais são considerados vários dos dados de entrada apresentados no Capítulo 6 deste trabalho.

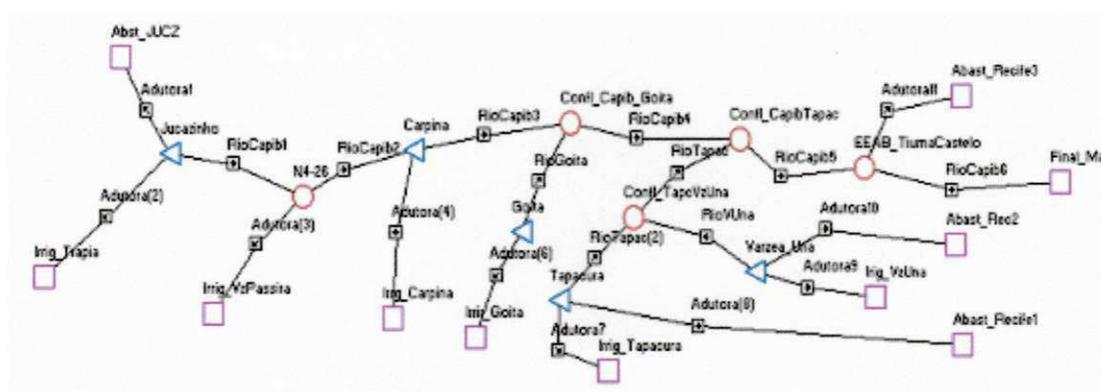


Figura 5.6 - Sistema de rede de fluxo do sistema hídrico em estudo no AcquaNet

Informações mais detalhadas sobre os nós, os arcos e outros pontos da Figura 5.6, com a devida correspondência em relação ao sistema hídrico em estudo, são apresentadas no Capítulo 7 deste trabalho.

5.4 - MEDIDAS DE DESEMPENHO DO SISTEMA

Uma importante característica de sistemas hídricos é sua capacidade de atender as demandas de forma satisfatória diante das incertezas futuras. Para compreender e avaliar os resultados da operação de reservatórios integrados a sistemas de recursos hídricos, há necessidade de adotar critérios que representem o grau de atendimento aos objetivos desses sistemas. Srinivasan et al., (1999) citam que regras de operação de reservatórios desenvolvidas com base no bom senso, e/ou experiência própria de operadores, podem ser adequadas sob

condições normais, porém, quando da ocorrência de períodos de déficits, como durante as secas, podem causar escassez hídrica e resultar em prejuízos econômicos e conseqüências irreversíveis. Segundo esses autores, a quantificação das características dos déficits e a incorporação explícita deles em projetos de sistemas de reservatórios, ou em modelos de operação, podem resultar em uma significativa contribuição, onde a performance operacional é usualmente expressa em termos de indicadores de desempenho, que descrevem as características das falhas, ou seja: a freqüência, a duração e a severidade das falhas, que juntas caracterizam os riscos no contexto do planejamento e operação desses sistemas.

Embora existam vários indicadores e critérios que podem ser utilizados para determinar o desempenho de um sistema de recursos hídricos, como abordado no Capítulo 3, os índices estatísticos definidos por Hashimoto et al.(1982) - confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, permitem medir a performance de um sistema hídrico, especialmente em períodos críticos, favorecendo a compreensão sobre a severidade de períodos de desempenho insatisfatório. Além disso, estes índices têm grande potencialidade para o planejamento estratégico de recursos hídricos, visto favorecer condições para se prever cenários futuros, importantes no planejamento de decisões operacionais, o que foi determinante na escolha dos mesmos para analisar o desempenho do sistema hídrico em estudo. O foco principal da análise passa pelo estudo das falhas a que esse sistema está sujeito, a partir de três maneiras: (i) qual é a freqüência de falhas do sistema (confiabilidade); (ii) como o sistema retorna ao seu estado satisfatório depois de uma falha (resiliência), e (iii) quais as conseqüências que uma falha pode provocar (vulnerabilidade).

Loucks (1997), citado por Kjeldsen e Rosbjerg (2001), propôs um critério de sustentabilidade para comparar diferentes cenários, tendo por base os índices estatísticos definidos por Hashimoto et al., o qual será também utilizado neste trabalho, como será apresentado na Seção 5.4.4, adiante.

5.4.1 - CONFIABILIDADE

Para cada uso da água de um sistema de recursos hídricos, é possível definir um nível desejável de atendimento da demanda X_0 , que precisa ser especificado, o qual que irá permitir a identificação de valores satisfatórios e não satisfatórios para a variável em consideração. Segundo Kjeldsen e Rosbjerg (2001), se para uma série de tempo de uma variável que define a performance de um dos usos da água, X_t , $t = 1, \dots, N$, uma falha é observada quando $X_t < X_0$. Chamando de “n” o número de intervalos de tempo (hora, dia, mês, etc.) onde $X_t < X_0$, a duração e o volume de déficit da j-ésima ocorrência de um período de falha podem ser

denotadas por d_j and S_j , respectivamente, com $j = 1, \dots, M$, onde M é o número de eventos de ocorrência de falhas. Os termos duração, d_j , e o volume de déficit, S_j , podem ser entendidos como ilustrados na figura 5.7.

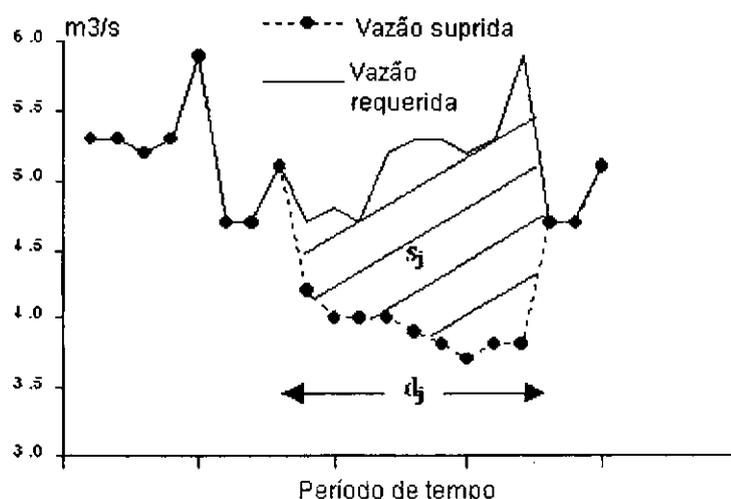


Figura 5.7 - Definição de duração e de volume de déficit em um período de falhas.
(Fonte: adaptado de Kjeldsen e Rosbjerg, 2001)

Com base nas considerações anteriores, observada a Figura 5.7, a confiabilidade (C) do sistema pode ser expressa como:

$$C = P\{X_t \leq X_0\} = 1 - \frac{n}{N} \quad (5.30)$$

A confiabilidade é considerada o oposto do risco. Quanto mais próximo de 1 o valor de C , melhor será a confiabilidade do sistema.

5.4.2 - RESILIÊNCIA

Dado que o sistema hídrico se encontra em falha, é interessante saber por quanto tempo ele se comportará dessa maneira. Observada a Figura 5.7, a resiliência (R) mede, em escala de tempo, a capacidade do sistema em retornar ao estado satisfatório, uma vez que a falha ocorre, podendo ser definida como o inverso do valor esperado, E , do tempo médio em que o sistema permanece em falha, ou seja:

$$R = \frac{1}{E\{d\}} = \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d_j \right]^{-1} \quad (5.31)$$

Um sistema que tenha muitas falhas mas que tende a se recuperar rapidamente, em alguns casos, é preferível a um sistema que tenha poucas falhas mas que se recupere

lentamente. Um sistema pouco resiliente se caracteriza por apresentar eventos prolongados de falhas, com recuperação lenta.

5.4.3 - VULNERABILIDADE

Embora o sistema possa se encontrar em estado insatisfatório, por um determinado período de tempo, este fato, no entanto, não demonstra quais as conseqüências que a falha pode estar ocasionando. Observada a Figura 5.7, a vulnerabilidade (V) mede a severidade das falhas a que o sistema está sujeito, podendo ser expressa por:

$$V = E\{s\} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M s_j \quad (5.32)$$

Quanto maior o déficit hídrico, maior será a vulnerabilidade do sistema. Um sistema pode ser muito resiliente, mas bastante vulnerável, enquanto que outro sistema pode ser pouco resiliente, no entanto, pouco vulnerável.

5.4.4 - SUSTENTABILIDADE

A partir dos resultados calculados para os índices descritos nas Seções 5.4.1 a 5.4.3, adotar-se-á o critério de sustentabilidade (Sus) para cada demanda hídrica do sistema, como definido por Loucks (1997) apud Kjeldsen e Rosbjerg (2001), visando selecionar os melhores valores na escala de prioridades estabelecidas para atendimento das demandas no conjunto de cenários idealizados, como apresentados no Capítulo 7 deste trabalho. O critério de sustentabilidade (Sus) é expresso por:

$$\text{Sus} = C * R * (1 - V) \quad (5.33)$$

onde:

Sus - sustentabilidade de cada demanda;

C - confiabilidade;

R - resiliência,

V- vulnerabilidade.

A sustentabilidade do sistema hídrico aumentará na razão direta de aumentos da confiabilidade e da resiliência, e de decréscimo da vulnerabilidade.

6 DADOS DO SISTEMA

6.1 - GENERALIDADES

Estão apresentados os principais dados e elementos utilizados no estudo, comentando-se, quando relevante, detalhes sobre a obtenção e métodos de tratamento empregados na definição de alguns deles. Os dados são originários de fontes diversas, tais como: instituições de governo, na esfera federal e estadual; empresas públicas e privadas, ou obtidos do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco - PERH-PE (1998), e de estudos anteriores. Fez-se necessário identificar indicadores do estágio do sistema hídrico, à época de início do presente trabalho, considerando situações de desenvolvimento econômico e social da região, envolvendo fatores responsáveis pelos diversos tipos de demanda e de aspectos que condicionam o uso das águas, seu armazenamento, controle e o consumo final pelos usuários.

No intuito de melhorar a compreensão sobre os diversos dados e informações utilizados no desenvolvimento deste trabalho, optou-se por apresentá-los focando o sistema hídrico, quando interessante desdobrar, em dois sub-sistemas: o sub-sistema Jucazinho-Carpina e o sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una.

6.2 - DADOS DO SISTEMA

6.2.1 - PRECIPITAÇÃO

6.2.1.1 - PRECIPITAÇÃO NO SUB-SISTEMA JUCAZINHO - CARPINA

Foram usados dados do trabalho de Andrade et al. (2001, 2002 a, b, c), que analisou registros de setenta e quatro (74) postos pluviométricos inseridos entre as coordenadas de 7° 30' a 8° 30' de latitude Sul, e 35° 10' a 36° 55' de longitude Oeste, localizados quer na sub-bacia ou na sua vizinhança. O preenchimento e extensão de dados mensais de postos com falhas nos registros consideraram o período base 1935 a 1992, aplicando-se o método da Ponderação Regional, com base em regressões lineares. Para representar a pluviometria da sub-bacia, entre os setenta e quatro postos selecionados, foram escolhidos vinte e nove (29) postos pluviométricos, definidos como “postos referência” (Tabela 6.1).

A análise de homogeneização das séries desses postos foi verificada pelo método da Dupla Massa, enquadrando-se postos inseridos numa mesma zona considerada

hidrológicamente homogênea. Para calcular a precipitação média da sub-bacia, que foi estimada em 657,3 mm, usou-se o método dos polígonos de Thiessen. A precipitação média, mensal e anual, nas áreas de drenagem dos reservatórios Jucazinho e Carpina estão apresentadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 - Precipitação média anual nos postos-referência do sub-sistema Jucazinho-Carpina (dados homogeneizados)

Nome	Posto				Precipitação média anual (mm)
	Código	Latitude (grau min)	Longitude (grau min)	Altitude (m)	
Algodão do Manso	3858925	7 58	35 53	380	641,6
Belo Jardim	3867613	8 20	36 27	616	666,2
Brejo da Madre Deus	3867324	8 09	36 23	646	819,0
Carapotós	3867289	8 08	36 04	501	422,8
Cumarú	3868062	8 01	35 42	395	870,4
Jataúba	3857905	7 58	36 29	600	540,9
Mandaçaia	3867244	8 06	36 17	380	559,2
Poção	3866363	8 11	36 41	1.035	750,7
São Caetano	3867672	8 19	36 09	552	481,2
Barriguda	3868227	8 06	35 52	400	562,1
Taquaritinga do Norte	3857891	7 54	36 03	785	998,1
Sta. Cruz do Capibaribe	3857961	7 57	36 12	472	457,4
Sta. Maria da Paraíba	3866066	8 02	36 41	800	728,3
Surubim	3858653	7 50	35 45	380	614,7
Toritama	3867088	8 01	36 04	376	553,8
Vertentes	3858805	7 55	35 59	401	703,3
Vila do Pará	3857727	7 51	36 22	675	312,2
Bezerros	3868453	8 14	35 45	471	536,6
Russinha	3869308	8 10	35 28	390	870,9
Bengalas	3869005	8 01	35 29	290	593,8
Apotí	3869125	8 04	35 23	240	879,1
BuenosAires	3859529	7 47	35 22	150	1039,3
Limoeiro	3859708	7 52	35 28	138	999,8
Bom Jardim	3858684	7 48	35 35	325	1006,6
Umbuzeiro	3858467	7 42	35 40	553	819,8
MataVirgem	3858439	7 44	35 49	645	697,2
Salgadinho	3858869	7 56	35 40	270	874,2
Cumarú	3868062	8 01	35 42	395	870,4
Gravatá	3868488	8 13	35 34	447	555,5

Tabela 6.2 - Precipitação média nas bacias dos reservatórios Jucazinho e Carpina (mm)

Bacia do reservatório Jucazinho												
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
48,1	102,0	98,2	78,5	77,7	70,3	32,5	18,7	21,5	14,2	21,9	31,9	605,6
Bacia do reservatório Carpina												
43,2	91,9	101,9	115,3	122,7	108,3	55,9	32,1	24,1	17,1	24,5	32,9	762,0

6.2.1.2 - PRECIPITAÇÃO NO SUB-SISTEMA TAPACURÁ - GOITÁ - VÁRZEA DO UNA

Foram considerados os dados contidos no trabalho de Barbosa et al. (2001). Para avaliar o regime de chuvas nas bacias dos reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, os autores utilizaram registros de precipitação dos postos pluviométricos (em parêntesis, os códigos dos postos): Russinha (3869308); Pombos (3869324); Serra Grande (3869431); Vitória de Santo Antão (3869242); Apoti (3869125); Chã de Alegria (3869057); Bela Rosa (3869078); Nossa Senhora da Luz (3869181); Bengalas (3869005); Glória do Goitá (3869041), Mussurepe (3859874) e Moreno (3869285). Os postos selecionados foram divididos para cada sub-bacia a partir da análise de zonas hidrologicamente homogêneas, preenchendo-se falhas pelo método da ponderação regional. A Tabela 6.3 apresenta precipitação média mensal nas áreas de drenagem dos três reservatórios, considerando o período 1968 a 1989.

Tabela 6.3 - Precipitação nas bacias dos reservatórios Tapacurá, Goitá, Várzea do Una (mm)

Bacia do reservatório Tapacurá												
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
43,9	50,5	132,3	163,8	142,8	183,1	213,7	78,4	47,1	22,9	31,7	40,4	1.150,6
Bacia do reservatório Goitá (mm)												
49,4	53,1	128,2	155,2	148,7	169,5	195,6	81,9	44,9	19,8	26,8	34,4	1.107,6
Bacia do reservatório Várzea do Una (mm)												
63,1	57,3	129,9	180,1	158,9	195,9	220,6	97,9	59,7	32,6	32,3	41,1	1.269,3

6.2.2 - VAZÕES AFLUENTES

Dados de fluviometria das sub-bacias e de vazões médias mensais afluentes aos reservatórios foram obtidos dos trabalhos de Andrade et al (2001, 2002 a, b, c) e Barbosa et al. (2001) para os sub-sistemas Jucazinho - Carpina e Tapacurá - Goitá - Várzea do Una, respectivamente. Alguns destes dados e informações mais importantes são comentados.

6.2.2.1 - VAZÕES NO SUB-SISTEMA JUCAZINHO - CARPINA

Dados de vazão médias mensais disponíveis para as estações códigos 39130000 - Toritama, e 39145000 - Limoeiro, cobrindo um período de quase quarenta anos (1956-1996), foram aproveitados. Do trabalho Projeto Básico Barragem de Jucazinho: Estudos Hidrológicos (DNOCS, 1992), foram consideradas as séries de descargas médias mensais da estação

Limoeiro, período de 1956 a 1983, e da estação Toritama, período 1966 a 1984. Dados do Relatório Técnico de Análise de Consistência de Dados Fluviométricos - Sub-Bacia 39, Bacia do Rio Capibaribe (CPRM, 1997), também foram usados.

Tabela 6.4 - Parâmetros do escoamento superficial em Toritama e Limoeiro

Vazão observada (período)	Fonte dos dados	Deflúvio médio anual (mm)	
		Estação Toritama	Estação Limoeiro
1956/57 – 1982/83	DNOCS	42,6	41,4
1983/84 – 1991/92	CPRM	47,6	50,6
1956/57 – 1991/92	DNOCS/CPRM	41,6	43,8
Precipitação média anual e rendimento do escoamento superficial			
Precipitação média anual na área de drenagem, período 1956 - 1992 (mm)		616,2	644,8
Rendimento superficial (%)		6,75	6,79

Observa-se pela Tabela 6.4 que a média dos deflúvios anuais das estações de Toritama e Limoeiro assumem valores aproximados, bem como os valores de rendimento médio do escoamento superficial. Estes resultados permitiram usar os dados de fluviometria das estações Toritama e Limoeiro para calcular uma série de trinta e seis (36) anos de vazões afluentes médias mensais para os reservatórios Jucazinho e Carpina, correspondente ao período 1957 - 1992, mediante aplicação de métodos de interpolação e extrapolação envolvendo fatores de proporcionalidade que consideram a variação mensal de vazões e volumes precipitados entre as áreas de drenagem das estações e dos reservatórios, como a seguir se expõe:

- **Afluências para o reservatório Jucazinho**

A estimativa das vazões mensais afluentes para o reservatório Jucazinho foi obtida por interpolação, a partir das séries de vazões mensais observadas nas estações Toritama, a montante, e Limoeiro, a jusante, considerado o período de 1956/57 a 1991/92. Para os cálculos de interpolação a nível mensal, que se dá por uma aproximação de segunda ordem, foi desenvolvido programa específico com base no software MATLAB. A formulação da interpolação é expressa por:

$$Q_{juc_{jt}} = Q_{tor_{jt}} + (Q_{lim_{jt}} - Q_{tor_{jt}}) * \left[\frac{(P_{juc_{jt}} * A_{juc} - P_{tor_{jt}} * A_{tor})}{(P_{lim_{jt}} * A_{lim} - P_{tor_{jt}} * A_{tor})} \right] \quad (6.1)$$

onde,

$Q_{juc_{jt}}$ - vazão afluente para o reservatório Jucazinho no ano j no mês t;

$Q_{tor_{jt}}$ - vazão afluente na estação Toritama no ano j no mês t;

$Q_{lim_{jt}}$ - vazão afluente na estação Limoeiro no ano j no mês t;

- $P_{juc_{jt}}$ - precipitação na bacia do reservatório Jucazinho no ano j no mês t ;
 $P_{tor_{jt}}$ - precipitação na bacia da estação Toritama no ano j no mês t ;
 $P_{lim_{jt}}$ - precipitação mensal na bacia da estação Limoeiro no ano j no mês t ;
 A_{juc} - área de drenagem do reservatório Jucazinho (4.172,0 km²);
 A_{tor} - área de drenagem da estação Toritama,
 A_{lim} - área de drenagem da estação Limoeiro (sem a presença de Jucazinho).

• Afluências para o reservatório Carpina

A estimativa das vazões naturais afluentes para o reservatório Carpina foi obtida por extrapolação, em três passos de cálculo, a partir das séries de vazões mensais observadas (1956/57 a 1991/92) nas estações fluviométricas de Toritama e Limoeiro, situadas a montante. Para os cálculos da extrapolação, a nível mensal, que se dá por uma aproximação de segunda ordem, foi desenvolvido programa específico com base no software MATLAB. Numa primeira etapa as afluências naturais foram estimadas para a área de drenagem total do reservatório (área=5.946,9 km²), não considerada a presença da barragem de Jucazinho, sendo determinadas por:

$$Q_{carp_{total(jt)}} = Q_{lim_{jt}} + (Q_{lim_{jt}} - Q_{tor_{jt}}) * \left[\frac{(P_{carp_{jt}} * A_{carp} - P_{lim_{jt}} * A_{lim})}{(P_{lim_{jt}} * A_{lim} - P_{tor_{jt}} * A_{tor})} \right] \quad (6.2)$$

onde,

- $Q_{carp_{total(jt)}}$ - vazão afluente ao reservatório Carpina no ano j no mês t ;
 $Q_{lim_{jt}}$ - vazão afluente à estação Limoeiro no ano j no mês t ;
 $Q_{tor_{jt}}$ - vazão afluente à estação Toritama no ano j no mês t ;
 $P_{carp_{jt}}$ - precipitação na bacia do reservatório Carpina no ano j no mês t ;
 $P_{lim_{jt}}$ - precipitação mensal na bacia da estação Limoeiro no ano j no mês t ;
 $P_{tor_{jt}}$ - precipitação na bacia da estação Toritama no ano j no mês t ;
 A_{carp} -- área de drenagem do reservatório Carpina (área = 5.946,9 km²);
 A_{lim} - área de drenagem da estação Limoeiro (sem a presença de Jucazinho),
 A_{tor} - área de drenagem da estação Toritama.

Num segundo passo de cálculo são estimadas as afluências naturais, a nível mensal, para a área de drenagem inserida entre os dois reservatórios, com área de 1.775 km², aproximadamente, sendo obtidas por:

$$Q_{juc_{carp_{jt}}} = Q_{carp_{total(jt)}} - Q_{juc_{jt}} \quad (6.3)$$

onde,

- $Q_{juc_{carp_{jt}}}$ - vazão natural originada na bacia entre Jucazinho e Carpina, no ano j no mês t ;
 $Q_{carp_{total(jt)}}$ - vazão natural (total) afluente ao reservatório Carpina no ano j no mês t ,
 $Q_{juc_{jt}}$ - vazão natural afluente ao reservatório Jucazinho no ano j no mês t .

Na configuração do sub-sistema hídrico Jucazinho-Carpina para o ORNAP (Figura 5.4 do Capítulo 5), os reservatórios podem ser conectados via pontos de conexão, denominados

nós do sistema, a outros elementos, a montante ou a jusante deles. No trecho de rio situado entre os reservatórios Jucazinho e Carpina, é lógico supor que o regime de fluxo será bastante complexo, sujeito que está a receber vazões naturais e descargas regularizadas de Jucazinho, além de poder ser influenciado por difusas retiradas de água a ser demandada pela irrigação das terras ribeirinhas. Não sendo do escopo deste estudo um aprofundamento da hidrodinâmica desse processo, na modelagem do sistema foram estabelecidos dois nós para aquele trecho de rio, sendo um situado no seu intermédio (nó Salgadinho) e o outro correspondendo à entrada do reservatório Carpina, ambos recebendo vazões afluentes de montante, mensalmente. Para estes dois nós, foi considerado que as respectivas vazões naturais afluentes seriam iguais à metade (vazão média) das vazões naturais afluentes calculadas para a área de drenagem entre os reservatórios, ou seja, para o nó Salgadinho e para o reservatório Carpina as afluências naturais foram determinadas, a nível mensal, por:

$$Q_{\text{salg}_{jt}} = Q_{\text{carp}_{jt}} = \frac{Q_{\text{juc}_{carp}_{jt}}}{2} \quad (6.4)$$

onde:

$Q_{\text{salg}_{jt}}$ - vazão natural afluente ao nó Salgadinho no ano j no mês t ,

$Q_{\text{carp}_{jt}}$ - vazão natural afluente ao reservatório Carpina no ano j no mês t .

A Tabela 6.5 apresenta valores de vazões médias mensais para os dois reservatórios para o período 1957-1992. No Anexo 3 estão apresentadas as séries de vazões consideradas.

Tabela 6.5 - Vazões afluentes médias mensais aos reservatórios.

Vazão média mensal para o reservatório Jucazinho (m ³ /s)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0,41	1,98	14,27	18,51	8,24	5,96	11,04	2,72	0,96	0,33	0,13	1,17
Vazão média mensal para o reservatório Carpina (m ³ /s)											
0,18	0,16	2,28	3,42	2,33	2,60	6,21	1,69	0,51	0,19	0,07	0,11

6.2.2.2 - VAZÕES NO SUB-SISTEMA TAPACURÁ - GOITÁ - VÁRZEA DO UNA

Na Figuras 5.5 do Capítulo 5, os nós representados pelos números 1, 2 e 3 referem-se às vazões afluentes aos reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, respectivamente. O nó 4 refere vazões afluentes ao rio Capibaribe a partir do reservatório de Carpina, adotadas no ORNAP como sendo de 1,5 m³/s e de 1,0 m³/s, para o período médio e seco, respectivamente. As vazões afluentes ao reservatório Tapacurá foram estimadas por interpolação, a partir das vazões mensais observadas da estação Vitória de Santo Antão (código 39170000), situada a montante do reservatório. A formulação de interpolação foi expressa por:

$$Q_{totalt} = Q_{estt} + Q_{just} \quad (6.5)$$

e

$$Q_{just} = \left(\sum_i P_{justi} * A_{justi} / \sum_j P_{estjt} * A_{estjt} \right) * Q_{estt} \quad (6.6)$$

onde:

Q_{totalt} - vazão afluente para o reservatório no mês t;

Q_{estt} - vazão afluente à estação fluviométrica no mês t;

Q_{just} - vazão afluente a jusante da estação fluviométrica no mês t;

P_{justi} - dados do posto de precipitação i na bacia a jusante da estação fluviométrica no mês t;

A_{just} - área de drenagem relativa ao posto de precipitação i a jusante da estação fluviométrica (até no reservatório);

P_{estjt} - dados do posto de precipitação j na bacia até a estação fluviométrica no mês t;

A_{est} - área de drenagem até a estação fluviométrica, relativa ao posto de precipitação j.

As vazões afluentes ao reservatório Várzea do Una foram geradas a partir do uso do modelo chuva-vazão SMAP, utilizando parâmetros obtidos de calibração do modelo para vazões da bacia do rio Tapacurá, considerada hidrológicamente homogênea em relação à de Várzea do Una. Para o reservatório Goitá, as vazões afluentes foram consideradas pela série fluviométrica da estação Sítio Engenho (código 39155000). Para complemento dos dados trabalhados por Barbosa et al. (2001), foram ainda cotejados os dados de vazão mensal do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Capibaribe (2001). A Tabela 6.6 apresenta valores de vazões médias mensais para o período 1968 a 1989. No Anexo 3 estão apresentadas as séries de vazões consideradas.

Tabela 6.6 - Vazões afluentes médias mensais

Vazão média mensal para o reservatório Tapacurá (m ³ /s)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1,01	2,05	3,78	4,74	5,24	7,63	9,97	4,18	1,84	1,25	0,96	1,30
Vazão média mensal para o reservatório Goitá (m ³ /s)											
1,20	2,26	3,89	4,59	5,61	8,49	8,82	4,30	2,56	1,63	1,19	1,74
Vazão média mensal para o reservatório Várzea do Una (m ³ /s)											
0,36	0,45	0,79	0,84	0,85	1,19	1,25	0,69	0,51	0,36	0,32	0,41

6.2.3 - EVAPORAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS

A estimativa de volumes mensais evaporados em reservatórios é obtida pela multiplicação da área média do espelho d'água pela correspondente lâmina de evaporação. Quando não se dispõe de medições locais da evaporação, faz-se uso de registros existentes na

região próxima ao reservatório, que resguarde condições fisiográficas assemelhadas. Na prática, para representar a evaporação em reservatórios, são usados dados de evaporação medida em tanque classe A, aplicando-se fator de correção, denominado de coeficiente de tanque KT, que depende do meio no qual o tanque está instalado e das condições atmosféricas do local, como velocidade do vento e umidade relativa.

Vários autores estabeleceram para a região Nordeste um coeficiente médio entre a evaporação de um açude e a evaporação do tanque classe A, variando entre 0,7 e 1,0, sendo o valor mais provável situado entre 0,8 e 0,85 (Laraque, 1989). Para o reservatório Jucazinho, foram considerados os valores das lâminas corrigidas de evaporação média mensal da estação meteorológica de Surubim, operada pelo INMET. Dados desta estação indicam umidade relativa média do ar de 75,8% e velocidade média do vento de 267 km/dia, o que permite, adotar um coeficiente Kt de 0,80, com base nos estudos de Doorenbos e Pruitt (1997).

Para o reservatório Carpina, os valores das lâminas corrigidas de evaporação média mensal têm por base dados da estação meteorológica Carpina, operada pelo IAA. Para os reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, a evaporação foi estimada com base nas lâminas corrigidas de evaporação média mensal da estação meteorológica Curado, em Recife, considerando um coeficiente Kt igual a 0,80. A Tabela 6.7 apresenta valores de evaporação média mensal adotados no estudo dos cinco reservatórios.

Tabela 6.7 - Lâminas corrigidas (mm) de evaporação média mensal nos reservatórios

Estação Surubim (reservatório Jucazinho)												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evap	184,8	167,2	160,0	138,4	112,8	91,2	98,4	124,8	112,4	172,0	177,6	173,6
Estação Carpina (reservatório Carpina)												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evap	166,4	136,8	136,8	133,6	117,6	85,6	88,0	104,8	125,6	146,4	162,4	158,4
Estação Curado (reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una)												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evap	176	147	144	122	118	114	114	130	140	165	170	173

6.2.4 - DADOS DOS RESERVATÓRIOS

No geral, onde não houver alusão específica ao Modelo AcquaNet, os dados e informações apresentados nesta seção são comentados em razão dos requisitos do ORNAP. Os dados dos reservatórios adotados no estudo, tanto estruturais quanto operacionais, dizem respeito às relações cota x área x volume; volumes de armazenamento, máximos e mínimos, permitidos; características hidráulicas das tomadas d'água, descarregadores de fundo e vertedouros, descargas mínimas e máximas permitidas.

A depender das vazões afluentes e alocação mensal de água do reservatório para os diversos usos, as áreas da superfície líquida, as cotas do nível de água e os volumes mensais do reservatório variam de mês a mês. Para que haja atualização mensal das áreas de superfície líquida, no caso da modelagem da operação de reservatórios, há necessidade da definição das relações matemáticas para cota, área e volume da bacia hidráulica.

Para o modelo AcquaNet, a perda por evaporação dos reservatórios é contabilizada através de um processo iterativo implícito que faz estimativas sucessivas da área média da superfície do reservatório durante o intervalo de tempo de simulação. O cálculo, basicamente, leva em conta o valor de uma área inicial, obtido por interpolação da área do espelho d'água em função do volume armazenado no reservatório (pela curva cota-área-volume fornecida ao modelo), para o começo do período. A tela de entrada de dados de cotas, áreas e volumes dos reservatórios, admite uma seqüência de até dezoito valores para esse conjunto de dados.

Para o modelo de otimização ORNAP, há necessidade de ser informada a definição das relações matemáticas para cota - área - volume da bacia hidráulica de cada reservatório, o que confere melhor precisão aos resultados. Valendo-se do software *Ajuste de Curvas* (versão 1999), desenvolvido pelo Professor Wilton Pereira da Silva, do Departamento de Física da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, foram definidas, a partir dos dados de projeto para cota-área-volume de cada reservatório, as funções matemáticas que melhor se ajustaram a esses dados, mediante verificação pelo teste do qui - quadrado. Estas funções estão apresentadas a seguir.

6.2.4.1 - RELAÇÕES COTA - ÁREA - VOLUME

6.2.4.1.1 - RESERVATÓRIO JUCAZINHO

i) Cota do nível d'água a partir do volume do reservatório

$$H_{r_t} = 10 * a * \left[\frac{V_{r_t}}{10^6} \right]^{(b * (V_{r_t} / 10^6)^c)} \quad (6.7)$$

onde,

- H_{r_t} - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
- V_{r_t} - volume (m³) do reservatório no mês t,
- a** - coeficiente de valor 24,23553977;
- b** - coeficiente de valor 0,011777792,
- c** - coeficiente de valor 0,173992268.

ii) Área da bacia hidráulica a partir da cota do nível d'água

$$A_{r_t} = 10^6 * e^{(a + 10 * b / H_{r_t} + c * \ln(H_{r_t} / 10))} \quad (6.8)$$

$$Ar_t = 10^6 * e^{(a + 10 * b / Hr_t + c * \ln(Hr_t / 10))} \quad (6.8)$$

onde,

Ar_t - área da bacia hidráulica (m^2) do reservatório no mês t;

Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;

a - coeficiente de valor 611,136336;

b - coeficiente de valor -4187,16058,

c - coeficiente de valor -137,79935.

iii) Volume do reservatório a partir da cota do espelho d'água

$$Vr_t = 10^6 * e^{(a + 10 * b / Hr_t + c * \ln(Hr_t / 10))} \quad (6.9)$$

onde,

Vr_t - volume (m^3) do reservatório no mês t;

Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;

a - coeficiente de valor 486,284507;

b - coeficiente de valor -3528,6066; c - coeficiente de valor -106,58925.

6.2.4.1.2 - RESERVATÓRIO CARPINA

i) Cota do nível d'água a partir do volume do reservatório

$$Hr_t = a * (Vr_t / 1000)^b + c \quad (6.10)$$

onde,

Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;

Vr_t - volume (m^3) do reservatório no mês t, ;

a - coeficiente de valor 0,5736482654;

b - coeficiente de valor 0,3275659702,

c - coeficiente de valor 83,0874972.

ii) Área da bacia hidráulica a partir da cota do nível d'água

$$Ar_t = 1.000 / (a + b * Hr_t^2)^c \quad (6.11)$$

onde:

Ar_t - área da bacia hidráulica (m^2) do reservatório no mês t;

Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;

a - coeficiente de valor -221,388332114;

b - coeficiente de valor 0,03164109918,

c - coeficiente de valor -1,8742822086.

iii) Volume do reservatório a partir da cota do espelho d'água

$$Vr_t = (a + b * Hr_t^{0,5})^c * 1000 \quad (6.12)$$

onde,

Vr_t - volume (m^3) do reservatório no mês t;

Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;

a - coeficiente de valor -147,4458075;

b - coeficiente de valor 16,42205215; c - coeficiente de valor 3,644354917.

6.2.4.1.3 - RESERVATÓRIO TAPACURÁ

i) Cota do nível d'água a partir do volume do reservatório

$$Hr_t = a * \left[\left(\frac{Vr_t}{b} \right)^c \right] * EXP \left(\frac{Vr_t}{b} \right) \quad (6.13)$$

onde,

- Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
 Vr_t - volume (m³) do reservatório no mês t,
a - coeficiente de valor 0,10895429385E+03;
b - coeficiente de valor 0,16169605138E+10;
c - coeficiente de valor 0,39356393124E-10.

ii) Área da bacia hidráulica a partir da cota do nível d'água

$$Ar_t = a * EXP(b * EXP(c * Hr_t)) \quad (6.14)$$

onde,

- Ar_t - área da bacia hidráulica (m²) do reservatório no mês t;
 Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
a - coeficiente de valor 0,18912346205E+08;
b - coeficiente de valor -0,28448130744E+04;
c - coeficiente de valor -0,80957354017E-01.

iii) Volume do reservatório a partir da cota do espelho d'água

$$Vr_t = a * EXP \left[\left(\frac{(\ln Hr_t - b)^2}{c} \right) \right] \quad (6.15)$$

onde,

- Vr_t - volume (m³) do reservatório no mês t;
 Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
a - coeficiente de valor 0,33958262411E+09;
b - coeficiente de valor 0,48753680843E+01;
c - coeficiente de valor -0,44033171950E-01.

6.2.4.1.4 - RESERVATÓRIO GOITÁ

i) Cota do nível d'água a partir do volume do reservatório

$$Hr_t = a * EXP \left[\left(\frac{\ln vr_t - b}{c} \right)^2 \right] \quad (6.16)$$

onde,

- Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
 Vr_t - volume (m³) do reservatório no mês t,
a - coeficiente de valor 0,48349032957E+02;
b - coeficiente de valor 0,11831779340E+02;
c - coeficiente de valor 0,96820903776E+02.

ii) Área da bacia hidráulica a partir da cota do nível d'água

$$Ar_t = a + b * Hr_t + c * Hr_t^2 \quad (6.17)$$

onde,

- Ar_t - área da bacia hidráulica (m^2) do reservatório no mês t;
 Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
 a - coeficiente de valor 0,21625E+08;
 b - coeficiente de valor -0,94592E+06;
 c - coeficiente de valor 0,10350E+05.

iii) Volume do reservatório a partir da cota do espelho d'água

$$Vr_t = a * EXP\left(\frac{b}{Hr_t}\right) + c \quad (6.18)$$

onde:

- Vr_t - volume (m^3) do reservatório no mês t;
 Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
 a - coeficiente de valor 0,16089955500E+12;
 b - coeficiente de valor -0,55791456707E+03;
 c - coeficiente de valor -0,14683086463E+07.

6.2.4.1.5 - RESERVATÓRIO VÁRZEA DO UNAi) Cota do nível d'água a partir do volume do reservatório

$$Hr_t = a * Vr_t (b * Vr_t^c) \quad (6.19)$$

onde,

- Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
 Vr_t - volume (m^3) do reservatório no mês t,
 a - coeficiente de valor 0,78361138609E+02;
 b - coeficiente de valor 0,34594399315E-03;
 c - coeficiente de valor 0,24106666912E+00.

ii) Área da bacia hidráulica a partir da cota do nível d'água

$$Ar_t = a * b^{Hr_t} + c \quad (6.20)$$

onde,

- Ar_t - área da bacia hidráulica (m^2) do reservatório no mês t;
 Hr_t - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
 a - coeficiente de valor 0,66972238439E+03;
 b - coeficiente de valor 0,10780867859E+01;
 c - coeficiente de valor -0,29037109307E+06.

iii) Volume do reservatório a partir da cota do espelho d'água

$$V_{r_t} = \frac{1}{(a + b * H_{r_t}^2)^c} \quad (6.21)$$

onde,

- V_{r_t} - volume (m³) do reservatório no mês t;
 H_{r_t} - cota (m) do nível d'água do reservatório no mês t;
a - coeficiente de valor -0,51370438156E+03;
b - coeficiente de valor 0,84262677852E-01;
c - coeficiente de valor -0,27173118570E+01.

6.2.4.2 - VOLUMES MÁXIMOS E MÍNIMOS DE ARMAZENAMENTO

A Tabela 6.8 apresenta os volumes máximos e mínimos operacionais considerados no estudo para os reservatórios Jucazinho e Carpina, a nível mensal. A Tabela 6.9 apresenta os volumes máximos e mínimos operacionais para os reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una. Conforme PQA/PE (1997), foi considerado um volume de espera de 27.000.000m³ para o reservatório Goitá, assumido de ser preservado em julho, mês com grandes afluições na bacia.

Tabela 6.8 - Volumes máximos e mínimos operacionais para Jucazinho e Carpina.

Reservatório Jucazinho			
Volumes	(m ³)	Cota (m)	Observação
Volume máximo (V _{rmax})	327.035.812	292	-
Volume mínimo (V _{rmin})	16.811.807	256	Para boa operação hidráulica da tomada d'água
Volume morto	7.093.175	250	-
Volume de espera (V _{esp})	100.000.000	-	-
Reservatório Carpina			
Discriminação	(m ³)	Cota (m)	Observação
Volume máximo (V _{rmax})	270.000.000	118	-
Volume mínimo (V _{rmin})	1.509.000	90	Para boa operação hidráulica da tomada d'água
Volume de porão	1.000.000	88,7	-
Volume de espera (V _{esp})	170.000.000	-	-

Tabela 6.9 - Volumes máximos e mínimos operacionais.

Volumes	Reservatório		
	Tapacurá	Goitá	Várzea do Una
V _{rmax} (Volume máximo – m ³)	98.700.000	53.000.000	11.600.000
V _{rmin} (Volume mínimo – m ³)	2.200.000	810.000	671.000
Volume de espera (V _{esp})	-	27.000.000	-

6.2.4.3 - TOMADAS D'ÁGUA, DESCARREGADORES E VERTEDOUROS

6.2.4.3.1 - RESERVATÓRIO JUCAZINHO

No cálculo de vazões mensais da adutora de Jucazinho (abastecimento) e de vazões mensais aduzidas pela tomada d'água para irrigação do perímetro Trapiá, foram considerados os dados indicados abaixo no quadro a seguir.

Discriminação	Vazão máxima (m ³ /s)	Cota limite do reservatório para boa operação da tomada (m)
- Tomada d'água da adutora de Jucazinho	2,0	256
- Tomada d'água para irrigação de Trapiá	4,0	256

O cálculo das vazões mensais liberadas para jusante através do descarregador de regularização, em não tendo sido obtida a sua curva - chave, é determinado por:

$$Qf_t = Cf * Af * (2g * (Hr_t - Hf))^{0,5} \quad (6.22)$$

onde;

- Qf_t - vazão aduzida pelo descarregador do reservatório no mês t;
- Cf - coeficiente de vazão do descarregador de valor 0,80;
- Af - área da seção transversal do descarregador, igual a 3,142 m² (Ø = 2,0m);
- Hr_t - cota do nível d'água do reservatório no mês t,
- Hf - cota de jusante da geratriz inferior do descarregador, igual a 251 m.

As vazões mensais extravasadas pelos vertedouros, tanto o principal quanto os auxiliares, são determinadas por:

$$Qv_t = Cv * Bv * (Hr_t - Hvert)^{1,5} \quad (6.23)$$

onde:

- Cv - coeficiente de descarga do vertedouro, de valor 0,492;
- Bv - largura da base do vertedouro, sendo 170 m para o principal, e 2 x 57 m (114 m) para os auxiliares;
- Hvert - cota da soleira do vertedouro, sendo cota 292 m para a soleira do vertedouro principal e cota 295 m para a soleira dos vertedouros auxiliares.

As vazões vertidas são calculadas se for satisfeita a condição de $Hvert \leq Hr_t \leq Hvmax$, em que Hvmax é a cota do nível d'água do reservatório que geraria as lâminas vertentes máximas projetadas para os vertedouros, no caso 6,0 m para o vertedouro principal e 3,0 m para os vertedouros auxiliares. A vazão de regularização para o rio Capibaribe foi estabelecida em 2,00 m³/s. A vazão máxima a ser liberada pelo reservatório, que não provoque inundações a jusante é de 1.000 m³/s.

6.2.4.3.2 - RESERVATÓRIO CARPINA

Para o cálculo de vazões mensais da tomada d'água para abastecimento e de vazões mensais aduzidas para irrigar o perímetro Carpina, foram adotados os dados:

Discriminação	Vazão máxima (m ³ /s)	Cota limite do reservatório para boa operação da tomada (m)
- Tomada d'água para abastecimento	3,0	90
- Tomada d'água perímetro Carpina	4,0	90

O cálculo das vazões mensais liberadas para jusante através do descarregador é determinado por:

$$Qf_t = Cf * Af * (2g * (Hr_t - Hf))^{0,5} \quad (6.24)$$

onde,

- Qf_t - vazão aduzida pelo descarregador do reservatório no mês t;
 Cf - coeficiente de valor 0,4766, obtido a partir da curva cota x vazão da descarga de fundo, conforme projeto;
 Af - área da seção transversal de um descarregador, sendo de 15,90 m² ($\varnothing = 4,50$ m);
 Hr_t - cota do nível d'água do reservatório no mês t,
 Hf - cota de jusante da geratriz inferior do descarregador, igual a 83,30 m.

As vazões mensais extravasadas por vertedouros, são determinadas por:

$$Qv_t = Cv * Bv * (Hr_t - Hvert)^{1,5} \quad (6.25)$$

onde:

- Cv - coeficiente de descarga do vertedouro, de valor 1,6;
 Bv - largura da base do vertedouro igual a 400,00 m,
 $Hvert$ - cota da soleira do vertedouro, de cota 118 m.

Vazões vertidas só ocorrerão se for satisfeita a condição de $Hvert \leq Hr_t \leq Hvmax$, com $Hvmax$ igual a 3,0 m. A vazão mínima de regularização para a calha do rio Capibaribe, correspondente à vazão ecológica, foi definida em 0,50 m³/s. A vazão máxima permitida a ser liberada pelo reservatório, para não provocar inundações a jusante, é de 300,00 m³/s.

6.2.4.3.3 - RESERVATÓRIOS TAPACURÁ-GOITÁ-VÁRZEA DO UNA

Para os três reservatórios, os dados para cálculo de vazões mensais aduzidas pelas tomadas d'água para abastecimento e irrigação, descarregadores e vertedouros estão apresentados nas Tabelas 6.10 a 6.13. O cálculo das vazões mensais liberadas para jusante

através de descarregadores é determinado pela Equação 6.22. As vazões mensais extravasadas pelos vertedouros, tanto os principais quanto auxiliares, são determinadas pela Equação 6.25.

A Tabela 6.13 apresenta dados usados para cálculo de vazões mensais liberadas para jusante através de vertedouros.

Tabela 6.10 - Dados das tomadas d'água para os reservatórios.

Dados	Reservatório		
	Tapacurá	Goitá	Várzea do Una
H _{tmin} - cota mínima para abastecimento (m)	84	55	84,5
H _{tmin} - cota mínima para irrigação (m)	84	55	84,5
Q _{tmax} - vazão máxima para abastecimento (m ³ /s)	3,0	-	0,9
Q _{tmax} - vazão máxima para irrigação (m ³ /s)	3,0	3,0	0,9

Tabela 6.11 - Dados dos descarregadores dos reservatórios.

Dados	Reservatório		
	Tapacurá	Goitá	Várzea do Una
C _f - coeficiente de vazão do descarregador	0,61	0,61	0,70
A _f - área da seção transversal de um descarregador de fundo (m ²)	1,56 (diam = 1m x 2)	9,82 (diam=2,5mx2)	0,785 (diam = 1m)
H _f - cota do nível d'água a jusante do descarregador (m)	80,0	51,0	83,0

Tabela 6.12 - Dados dos descarregadores para ETA.

Dados	Reservatório	
	Tapacurá	Várzea do Una
C _f - coeficiente de vazão da descarga de fundo	0,61	0,70
A _f - área da seção transversal de um descarregador (m ²)	3,14 4 (diam=1m)	0,282(diam=0,6m)
H _f - cota do nível d'água a jusante do descarregador (m)	84,0	84,5

Tabela 6.13 - Dados dos vertedouros.

Dados	Reservatório		
	Tapacurá	Goitá	Várzea do Una
C _v - coeficiente de descarga	1,95 (Central) 1,95 (Lateral)	1,95	1,95
B _v - largura (m)	6,0 (Central) 12,0 (2 Laterais)	55,0	50,0
H _{vert} - cota de crista (m)	103,0 (Central) 105,0 (2 Laterais)	70,0	104,0
H _{vmax} - lâmina d'água vertente máxima (m)	7,0 (Central) 5,0 (2 Laterais)	6,75	2,0

Reportando-se à Figura 5.5 (Capítulo 5), é importante destacar: i) a vazão referida como Q₁₁, é a vazão a ser otimizada pelo modelo para atendimento da ETA, a partir das captações Tiúma e Castelo, com limite máximo de 1,5 m³/s e limite mínimo de 0,5 m³/s; ii) a vazão referida como Q₁₂, é a vazão a ser definida pelo modelo para atendimento da ETA, a partir do

reservatório Tapacurá, com limite máximo de 3,0 m³/s e limite mínimo de 0,5 m³/s; iii) a vazão referida como Q13, é a vazão a ser definida pelo modelo para atendimento da ETA, a partir do reservatório Várzea do Una, com limite máximo de 0,9 m³/s e limite mínimo de 0,5 m³/s. O somatório dessas vazões otimizadas, como condição obrigatória imposta ao modelo, tem que fechar com a demanda (Qd₁) de 4,0 m³/s de água bruta que deve ser entregue à ETA para atender o abastecimento de Recife.

6.2.4.4 - FICHAS TÉCNICAS DAS BARRAGENS

6.2.4.4.1 - BARRAGEM DE JUCAZINHO

a) Dados Técnicos

- Rio barrado	Capibaribe
- Município	Surubim
- Área da bacia hidrográfica	4.172 km ²
- Barragem tipo gravidade	CCR
- Extensão da crista	442,0 m
- Altura máxima	63,2 m
- Cota do coroamento	299,0 m
- Largura do coroamento	8,0 m
- Tomada d'água tipo Galeria com Torre (conduto ϕ 2,0 m), sendo:	
- Acionamento de montante	Comporta vagon
- Acionamento de jusante	Dispensor Howell-Bunger
- Cota da Tomada d'água	250,0 m
- Descarga de regularização (prevista)	2,72 m ³ /s
- Descarga máxima	35,0 m ³ /s
- Vertedouro principal tipo "Stepped Spillway"	Em concreto
- Cota da soleira	292,0 m
- Comprimento (vão livre)	170,0 m
- Descarga máxima (cota 298,0 m)	5.446,69 m ³ /s
- Vertedouros auxiliares (02) tipo "Canal Lateral"	Em concreto
- Cota da soleira	295,0 m
- Comprimento total:	
- Pela margem esquerda	57,0 m
- Pela margem direita	57,0 m

- Descarga máxima total	1.291,30 m ³ /s
- Área da bacia hidráulica (cota 292,0 m)	15,99 km ²
- Volume de acumulação (cota 292,0 m)	327.035.812 m ³
- Volume para atenuação de enchentes	100.000.000 m ³
- Volume morto (cota 250,0 m)	7.093.175 m ³
- Volume ativo	219.942.637 m ³
- Vazão efluente máxima (restrição para jusante)	1.000 m ³ /s
- Conclusão da obra	13/02/1998
- Administração do empreendimento	DNOCS

b) Finalidade (Uso múltiplo)

- Abastecimento com água tratada de 15 cidades, inclusive Caruaru, e 45 localidades rurais, todas no agreste semi-árido, beneficiando uma população estimada, atualmente, em 383.915 habitantes. No horizonte de projeto do sistema adutor (ano de 2020), para uma vazão de 1,8 m³/s, estima-se o atendimento de uma população de 715.352 habitantes;
- Irrigação de uma área de 6.750 ha, a jusante, prevendo-se a geração de 4.000 empregos diretos e 8.000 indiretos, beneficiando uma população estimada em 24.000 pessoas;
- Piscicultura, com produção esperada de 500 toneladas de pescado por ano, para benefício de 3.000 famílias;
- Controle de enchentes do alto curso do rio Capibaribe, preservando as cidades a jusante, como Limoeiro e Salgadinho, até Recife, e
- Perenização do leito do rio Capibaribe a jusante da barragem com uma descarga prevista de 2,72 m³/s.

6.2.4.4.2 - BARRAGEM DE CARPINA

a) Dados Técnicos

- Rio barrado	Capibaribe
- Município	Carpina
- Área da bacia hidrográfica	1.175 km ²
- Barragem tipo gravidade	terra com enrocamento
- Extensão (900 m de maciço, e 730 m de diques)	1.720 m
- Altura máxima	42 m
- Cota de coroamento	124 m
- Largura no coroamento	8 m

- Largura na base maior	200 m
- Sangradouro de emergência (cota 118 m)	Tipo "Vallecito Dam"
- Estrutura de tomada d'água em forma de caixa de 22,60 m x 11,00 x 11,40 m (comprimento, largura e altura), dotada de 48 aberturas providas de grades de proteção, composta ainda de:	
- Torre de comando com sistemas de acionamento das comportas, grades e stop-logs, incluindo ponte rolante;	
- Galeria com dois condutos, cada uma com ϕ 4,50 m que cruza todo o corpo transversal da barragem, tendo na sua parte de montante, para cada conduto, uma comporta tipo vagão. (geratriz inferior das tubulações na cota 84,20 m).	
- Bacia de dissipação de energia (15 m x 50 m)	Concreto armado
- Área da bacia hidráulica na cota 118 m	24,65 km ²
- Volume máximo (cota 118 m)	270.000.000 m ³
- Volume para atenuação de enchentes (Projeto)	270.000.000 m ³
- Volume morto (cota 89,0 m)	1.190.000 m ³
- Vazão efluente máxima (laminação da cheia)	300 m ³ /s
- Conclusão da obra	29/05/1978
- Administração do empreendimento	DNOCS/COMPESA

b) Finalidade

- Regularizar a vazão do rio Capibaribe em 300 m³/s, evitando grandes enchentes na Região Metropolitana do Recife.

Observações sobre o reservatório Carpina:

- Conquanto se reconheça a importância da função protetora da barragem de Carpina, projetada para controle de cheias, a exclusividade desse papel vem sendo questionada desde há algum tempo por interesses diversos, fazendo com que o reservatório hoje tenha compromisso parcial de utilização como fonte de recursos hídricos, seja para reforço do abastecimento do Recife, seja para sustentar irrigações não formais em terras invadidas no entorno de sua bacia hidráulica, quanto em algumas outras áreas adjacentes à barragem, cujas demandas não se conhece com precisão.
- A COMPESA, informalmente operando o reservatório, vem tentando manter, desde meados de 1992, uma acumulação de não mais do que 56.600.000 m³, correspondente à

cota 104 m, permitindo derivar, quando possível, uma vazão de regularização para jusante para alimentar as captações a fio d'água de Tiúma e Castelo, no rio Capibaribe.

6.2.4.4.3 - BARRAGEM DO TAPACURÁ

a) Dados Técnicos

- Rio barrado	Tapacurá
- Município	São Lourenço da Mata
- Área da bacia hidrográfica	360 km ²
- Barragem principal (tipo gravidade):	Concreto massa
- Comprimento	390 m
- Altura máxima	40 m
- Cota de coroamento	110 m
- Largura no coroamento	4,50 m
- Barragens auxiliares de terra (diques laterais)	02
- Capacidade de acumulação na cota 110 m	170.000.000 m ³
- Capacidade de acumulação (cota 103 m)	98.700.000 m ³
- Volume morto (cota 84)	2.400.000 m ³
- Área da bacia hidráulica na cota 110 m	13 km ²
- Área da bacia hidráulica na cota 103 m	9,3 km ²
- Descarga de regularização	2,7 m ³ /s
- Descarga máxima regularizada (cheia amortecida)	150 m ³ /s
- Conclusão da obra	1973

- Administração do empreendimento: A barragem, construída pelo extinto Departamento Nacional de Saneamento - DNOS, está sob responsabilidade do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca - DNOCS, porém tem sua administração e operação exercida pela Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA.

b) Finalidades

- Regularizar a vazão do rio Tapacurá, tributário do Capibaribe, de 870 m³/s para uma descarga máxima de 150 m³/s;
- Armazenar um volume de 98.700.000 m³ (cota 103 m) para o abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife, permitindo vazão de regularização de 2,70 m³/s, em regime normal.

6.2.4.4.4 - BARRAGEM DO VÁRZEA DO UNA

a) Dados Técnicos

- Rio barrado	Várzea do Una
- Município	São Lourenço da Mata
- Área da bacia hidrográfica	37,5 km ²
- Barragem de seção homogênea	Terra
- Altura máxima	25,7 m
- Cota da soleira do sangradouro	104,7 m
- Capacidade de acumulação (cota 104,7)	11.600.000 m ³
- Área da bacia hidráulica	1,39 km ²
- Vazão de regularização	0,54 m ³ /s

b) Finalidade

- Abastecimento da zona oeste da cidade Recife, reforçando e fazendo parte do Sistema Tapacurá, contribuindo com 0,54 m³/s de vazão regularizada. Há cogitação de se explorar Várzea do Una, isoladamente, para fornecer água para o atendimento exclusivo das cidades de São Lourenço da Mata e Camaragibe, que estão na sua área de influência direta.

6.2.4.4.5 - BARRAGEM DO GOITÁ

a) Dados Técnicos

- Rio barrado	Goitá
- Município	Glória do Goitá
- Área da bacia hidrográfica	405 km ²
- Barragem tipo gravidade	Concreto
- Comprimento	220 m
- Altura máxima	38 m
- Cota de coroamento	78 m
- Largura no coroamento	3 m
- Área da bacia hidráulica (cota 70)	5,85 km ²
- Volume máximo de acumulação (cota 78)	125.000.000 m ³
- Volume de acumulação (cota 70)	54.032.260 m ³
- Volume morto (cota 51)	3.100.000 m ³
- Descarga máxima regularizada (cheia amortecida)	100 m ³ /s

- Conclusão da obra 1978
- Administração do empreendimento: A barragem, construída pelo DNOS (extinto), está sob responsabilidade do DNOCS.

b) Finalidade

- Regularizar a vazão do rio Goitá, tributário do Capibaribe, em $100 \text{ m}^3/\text{s}$, fazendo diminuir o risco de enchentes na Região Metropolitana do Recife.

6.2.5 - DEMANDAS HÍDRICAS

A quantificação das estimativas das demandas atuais de água considerou três categorias de usuários: o abastecimento urbano - onde a água é um bem de consumo final; a irrigação - onde a água é um bem de consumo intermediário, e o uso ecológico - que visa assegurar, ao longo das calhas dos rios, a jusante das barragens, um padrão mínimo de qualidade da água dos cursos d'água para preservação da fauna e flora, e para a manutenção de ambiente propício às atividades humanas. Não se considerou no estudo a demanda para dessedentação animal, a partir de cada reservatório, em razão do que a seguir é exposto.

Consultado o PERH-PE (1998), uma breve análise da pecuária na bacia do Capibaribe, concentrada na região Agreste, mostra uma atividade explorada em regime ainda bastante extensivo, de baixo nível tecnológico, baixa eficiência e produtividade. O fraco desempenho da pecuária, agravado por freqüentes períodos de seca e de estiagem, faz esta atividade ser pouco demandadora de água na bacia. Segundo o PERH-PE, a demanda de água para abastecimento animal em toda a bacia do Capibaribe foi avaliada em $5.524.757 \text{ m}^3/\text{ano}$, cerca de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este valor de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ representa apenas cerca de 30% da vazão mínima de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ definida para ser mantida, obrigatoriamente, nas calhas de rios a jusante das barragens em estudo. Observada a vazão de regularização de $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ definida no estudo para o reservatório de Jucazinho, por exemplo, excluído o uso da água para o abastecimento urbano, a demanda de água para abastecimento animal, em toda a bacia do Capibaribe, representaria tão somente 8,5% dessa vazão de regularização. Por não se conhecer a existência de empreendimentos (mesmo que projetados) destinados à criação intensiva de rebanhos que viessem a motivar grande consumo de água a partir de cada um dos reservatórios, desprezou-se no estudo a demanda para abastecimento animal.

6.2.5.1 - ABASTECIMENTO

Na modelagem do sistema hídrico, os reservatórios Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá e Várzea do Una foram testados para atender as demandas apresentadas na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Demandas do abastecimento urbano.

Reservatório	Demanda de abastecimento (m ³ /s)
Jucazinho	1,80
Carpina	1,50 a 1,00
Tapacurá e Várzea do Una	4,0
Goitá	-

Para o reservatório Jucazinho, a vazão de 1,80 m³/s (vazão de projeto do sistema adutor em construção) considera o abastecimento humano e industrial. No caso do reservatório Carpina, as demandas de abastecimento referem o possível aporte de uma vazão de reforço para o abastecimento da cidade de Recife. É importante colocar que outros valores para essa vazão de reforço, a partir do reservatório Carpina, foram testados no presente trabalho, visto indicativos de um estudo conduzido pela extinta Companhia Integrada de Serviços Agropecuários de Pernambuco - CISAGRO (1991), que cogitou vazões variando de 1,40 m³/s (para uma acumulação de 41 hm³) a 2,7 m³/s (para uma acumulação de 95,4 hm³), exclusivamente para abastecimento urbano.

A demanda de abastecimento a ser atendida pelos reservatórios Tapacurá e Várzea do Una (4,0 m³/s), contando com a vazão possível de ser captada pelas elevatórias de água bruta de Tiúma e Castelo, corresponde ao abastecimento de grande parte da cidade do Recife e das cidades de Camaragibe e São Lourenço, incluindo o uso industrial, considerando a capacidade de tratamento de água da ETA Marechal Castelo Branco. Tanto na modelagem de otimização quanto na de simulação da operação do sistema hídrico, as demandas mensais do abastecimento, além de serem de atendimento obrigatório, são consideradas fixas ao longo do ano.

6.2.5.2 - IRRIGAÇÃO

O desenvolvimento da irrigação na região de influência dos reservatórios é um reclamo social sempre presente, uma vez que pode possibilitar o incremento da economia regional pela geração de emprego e renda no campo, com produção de alimentos. Nos estudos prospectivos aqui idealizados, considerando que a irrigação é responsável por elevadas taxas de demanda de água, considerou-se que a expansão da agricultura dar-se-á pela exploração agrícola de

áreas identificadas como potencialmente irrigáveis. Para o ORNAP, a demanda da irrigação é avaliada pelo balanço hídrico mensal do solo, como apresentado no Capítulo 5, sendo considerados, entre outros dados: dimensão dos perímetros; características do solo e respectiva aptidão agrícola; tipos de culturas; parâmetros fenológicos das culturas; aspectos hidroclimáticos, planos culturais e sistemas de irrigação adotados.

6.2.5.2.1 - ÁREAS POTENCIALMENTE IRRIGÁVEIS

Na área de influência direta do reservatório Jucazinho, conforme estudos do DNOCS (1992), sobressaem-se duas manchas principais de terras, enquadradas na Classe 3, portanto de terras aptas à irrigação. A mais próxima situa-se à borda direita do lago, próximo à localidade Trapiá, denominada aqui como “Perímetro Trapiá”. Esta área, estimada em 4.500 ha, indicada como de ocorrência de Vertisolos, está enquadrada na classe 3sd de terras para irrigação, com alguns problemas de solo (mecanização) e drenagem. A outra, com 4.500 ha, aproximadamente, está a jusante da barragem, à margem direita do rio, cerca de 10 km a leste do município de Passira. Com predomínio de Vertisolos, ela se enquadra nas classes de terras para irrigação 3sd e 3st, com algumas limitações de solo, drenagem e topografia.

Juntando-se a área de Passira com a mancha de solos aluviais (classe 2 de terras de boa qualidade) da faixa das várzeas a jusante da barragem de Jucazinho, numa extensão de quase 52 km até a barragem de Carpina, foi composto o chamado “Perímetro Várzeas - Passira”, com área aproximada de 6.750 ha, localizado entre os dois reservatórios, conforme esquema apresentado na Figura 5.4. do Capítulo 5.

Na região de influência direta do reservatório Carpina, conforme estudos feitos pela CISAGRO (1991), ocorrem em áreas mais próximas à barragem grandes manchas do solo Latosol Vermelho Amarelo Eutrófico, apropriadas para cultivos temporários e potencialmente aproveitáveis para a agricultura irrigada. Para os fins do estudo, foi adotada uma área de 1.800 ha situada no entorno da represa, aqui denominada de “Perímetro Carpina”, formado de terras arrendadas a colonos pelo DNOS, desde 1986.

Na região de influência direta dos reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, baseando-se em consulta ao trabalho Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco, Volume I (1973), do Ministério da Agricultura, definiu-se, para fins do estudo, a exploração de três perímetros irrigados, cada um com área de 4.000 hectares. Os três perímetros de irrigação, em áreas de predomínio de solos como o Latosol Vermelho Amarelo e o Podzólico Vermelho, apropriados para cultivos temporários e perenes, foram

denominados de Perímetro 1 (Tapacurá), Perímetro 2 (Goitá) e Perímetro 3 (Várzea do Una), conforme esquema apresentado na Figura 5.5 do Capítulo 5.

6.2.5.2.2 - APTIDÃO AGRÍCOLA

Com base no trabalho Aptidão Agrícola das Terras de Pernambuco (1979), do Ministério da Agricultura, verifica-se que os solos Vertisolos têm potencialidade para exploração agrícola, entre outras, das seguintes culturas: milho; feijão; algodão; tomate; goiaba; banana; graviola; sorgo, palma forrageira e algodão, não se adequando ao plantio de melão, melancia e coco, por exemplo. Para os solos aluviais, de boa fertilidade natural, é recomendado o cultivo intensivo de manga; goiaba; banana; uva, melão, melancia, mamão, coco, laranja, limão, milho e feijão, maracujá, graviola, arroz, hortaliças, entre outras culturas. Já para terrenos com predomínio do solo Latosol Vermelho Amarelo Eutrófico, são adaptáveis, entre outras, culturas como a banana, tomate, manga, jaca, goiaba, melancia, cajú, mamão, coco, cana de açúcar, milho, mandioca, beterraba, melão, graviola, feijão, amendoim e hortaliças. De acordo com estas informações, foram selecionados dez tipos de cultura para a área de influência dos reservatórios Jucazinho e Carpina, conforme se apresenta na Tabela 6.17, que conferem uma boa representação da tradição agrícola da região. Para a área de influência dos reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, segundo Barbosa et al. (2001), as culturas definidas foram: banana, tomate, melancia, feijão, milho, algodão e cana-de-açúcar, conforme apresentado na Tabela 6.18.

6.2.5.2.3 - DADOS PARA ESTIMATIVA DAS DEMANDAS DA IRRIGAÇÃO

i) Precipitação efetiva e coeficientes de cultivo

Na estimativa da precipitação efetiva mensal P_{ce} (Equações 5.5 e 5.6 do Capítulo 5) para os perímetros Trapiá, Carpina e Várzeas - Passira, tomou-se como base valores homogêneos de precipitação dos postos pluviométricos de Algodão do Manso (código 3858925), Carpina (código 3859751) e Salgadinho (código 3858869). As precipitações médias mensais para estes postos estão apresentadas na Tabela 6.15.

Para os perímetros 1 (Tapacurá), perímetro 2 (Goitá) e perímetro 3 (Várzea do Una), foram adotados, respectivamente, valores homogêneos de precipitação dos postos pluviométricos de Vitória de Santo Antão (código 3869242), Chã de Alegria (código 3869057) e Nossa Senhora da Luz (código 3869181), conforme Tabela 6.16.

Tabela 6.15 - Precipitação média mensal (mm)

Posto Algodão do Manso (perímetro Trapiá)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
28,4	34,1	84,4	87,7	100,6	100,9	86,2	44,6	23,0	14,2	14,7	22,8
Posto Carpina (perímetro Carpina)											
35,3	54,8	113,6	135,6	161,4	178,6	154,7	84,0	39,6	20,8	19,3	30,8
Posto Salgadinho (perímetro Várzeas-Passira)											
32,3	50,1	106,2	119,8	122,2	147,7	129,8	65,4	35,4	19,7	20,5	25,2

Tabela 6.16 - Precipitação média mensal (mm)

Posto Vitória de Santo Antão (perímetro Tapacurá)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
42,1	57,2	149,4	162,7	150,4	201,5	220,8	86,7	55,1	32,7	42,3	47,5
Posto Chã de Alegria (perímetro Goitá)											
51,5	63,6	138,9	200,6	221,5	240,4	230,6	93,3	50,2	19,8	36,2	27,8
Posto Nossa Senhora da Luz (perímetro Várzea do Una)											
79,5	71,7	178,7	262,3	227,5	278,9	305,7	135,5	83,0	45,3	43,3	53,3

Para o cálculo da evapotranspiração potencial Etp (mm/mês) das culturas selecionadas, foram adotados coeficientes de cultivo Kc, conforme se apresenta nas Tabela 6.17 e 6.18.

Tabela 6.17 - Kc das culturas dos perímetros Trapiá, Carpina e Várzeas - Passira

Culturas	Mês do ano											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Banana	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Tomate _(s)		0,45	0,75	1,15	0,80							
Melancia _(es)								0,75	1,00	0,75		
Melão _(es)								0,75	1,00	0,75		
Feijão _(s)			0,70	1,10	0,90							
Feijão _(es)								0,70	1,10	0,90		
Milho _(s)			0,40	0,80	1,15	1,00						
Graviola	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Goiaba	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Coco anão	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Algodão _(es)								0,50	0,75	1,15	0,75	

Fonte (coeficientes de cultivo - Kc): Fuentes Yagüe e Cruz Roche (1990) apud Gomes (1999).

(s) - safra; (es) - entresafra.

Tabela 6.21 - Plano cultural anual para o perímetro Várzeas - Passira

Culturas	Mês do ano												Sistema de irrigação
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Banana													Gotejam.
Tomate _(s)													Sulco
Melancia _(es)													Aspersão
Melão _(es)													Sulco
Feijão _(s)													Aspersão
Feijão _(es)													Aspersão
Milho _(s)													Aspersão
Graviola													Gotejam.
Goiaba													Gotejam.
Coco anão													Gotejam.
Algodão _(es)													Aspersão

Tabela 6.22 - Plano cultural anual para os perímetros Tapacurá, Goitá, Várzea do Una.

Culturas	Mês do ano												Sistema de irrigação
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Banana													Aspersão
Tomate													Sulco
Melancia _(es)													Aspersão
Feijão _(s)													Aspersão
Feijão _(es)													Aspersão
Milho													Aspersão
Algodão _(es)													Aspersão
Cana de açúcar													Aspersão

(s) - safra; (es) – entresafra.

iii) Produtividades das culturas e dados dos sistemas de irrigação

A Tabela 6.23 apresenta a produtividade de cada cultura, segundo dados do “Manual de Orçamentos Agropecuários” e da “Agenda do Produtor Rural”, publicações editadas pelo Banco do Nordeste S. A. (2003). No estudo, considera-se que a banana é do tipo pacovan, o tomate é envarado, o feijão é phaseolus, o milho é para espigas e o algodão é do tipo herbáceo. Os dados dos sistemas de irrigação e de trabalho requerido, estão apresentados na Tabela 6.24.

Tabela 6.23 - Produtividade das culturas

Cultura	Produtividade (kg/ha/ano)	Cultura	Produtividade (kg/ha/ano)	Cultura	Produtividade (kg/ha/ano)
Banana	40.000	Feijão _(s)	1.800	Goiaba	16.000
Tomate _(s)	50.000	Feijão _(es)	1.800	Coco anão	40.000
Melancia _(es)	25.000	Milho _(s)	8.000	Algodão _(es)	3.000
Melão _(es)	15.000	Graviola	7.000	Cana	60.000

Tabela 6.24 – Dados dos sistemas de irrigação

Cultura	Sistema de irrigação	Eapl (%)	Esis (%)	Hdc (homem/dia/ha/ano)	Pirr (R\$ / ha)	Vútil (anos)	Tam (%)
Banana	Gotejamento	90	90	188	3.000,00	10	8
Tomate _(s)	Sulco	40	90	367	1.000,00	1	0
Melancia _(es)	Aspersão	65	90	115	5.000,00	15	8
Melão _(es)	Sulco	40	90	137	1.000,00	1	0
Feijão _(s)	Aspersão	65	90	61	5.000,00	15	8
Feijão _(es)	Aspersão	65	90	61	5.000,00	15	8
Milho _(s)	Aspersão	65	90	105	5.000,00	15	8
Graviola	Gotejamento	90	90	129	3.000,00	10	8
Goiaba	Gotejamento	90	90	111	3.000,00	10	8
Coco anão	Gotejamento	90	90	100	3.000,00	10	8
Algodão _(es)	Aspersão	65	90	103	5.000,00	10	8
Cana açúcar	Aspersão	65	90	125	3.000,00	15	8

Na Tabela 6.24, os parâmetros Eapl, Esis, Hdc, Pirr, Vútil e Tam, devem ser entendidos como: i) Eapl - Eficiência do sistema de aplicação da água de irrigação (Fonte: Mc Culloch e Pizarro, apud Gomes, 1999, para aspersão e gotejamento); ii) Esis - Valor percentual (%) da eficiência do sistema de distribuição de água para irrigação, para distribuição através de canais e tubos, de acordo com Gomes (1999); iii) Hdc - Trabalho requerido médio por cultura em cada ano (homem/dia/ha/ano) pela conta cultural do Banco do Nordeste (2003); iv) Pirr - Custo do investimento de implantação do sistema de irrigação, de acordo com a conta cultural do Banco do Nordeste (2003); v) Vútil - Vida útil do sistema de irrigação, e vi) Tam - Taxa anual de amortização (%/ano) do investimento com o sistema de irrigação.

iv) Áreas máximas e mínimas de cada cultura por perímetro

Para o ORNAP, a Tabela 6.25 apresenta as áreas máximas (A_{cmáx}) e mínimas (A_{cmin}) adotadas no processo de otimização. Estão arbitradas áreas mínimas (A_{cmin}) para irrigação obrigatória apenas para os perímetros do sub-sistema Jucazinho-Carpina, visto a prática de irrigações informais que já ocorrem nas cercanias das bacias hidráulicas destes reservatórios, caso típico do reservatório Carpina. As áreas totais estimadas para a irrigação (A_{pmax}) em cada perímetro são: Trapiá: 4.500 ha; Várzeas/Passira: 6.750 ha; Carpina: 1.800 há; Tapacurá: 4.000 ha; Goitá: 4.000 ha, e Várzea do Una: 4.000 ha.

A Tabela 6.26 apresenta o custo médio de produção das culturas, considerando tratos culturais, manejo da irrigação, insumos, colheita e mão de obra, de acordo com o Manual de Orçamentos Agropecuários - BNB (2003).

Tabela 6.25 - Dados de áreas máximas e mínimas de cada cultura por perímetro (ha)

Culturas	Perímetro					
	Trapiá		Carpina		Várzeas - Passira	
	Ac _{max}	Ac _{min}	Ac _{max}	Ac _{min}	Ac _{max}	Ac _{min}
Banana	1.600	30	300	20	1.500	20
Tomate _(s)	300	5	100	5	250	2
Melancia _(es)	0	0	150	15	400	10
Melão _(es)	0	0	150	15	400	10
Feijão _(s)	400	5	100	5	500	15
Feijão _(es)	600	10	100	5	100	2
Milho _(s)	400	10	200	5	500	15
Graviola	900	20	400	15	1.000	15
Goiaba	900	20	300	30	1.500	20
Coco anão	0	0	400	20	1.500	20
Algodão _(es)	500	10	0	0	350	10

Culturas	Perímetro					
	Tapacurá		Goitá		Várzea do Una	
	Ac _{max}	Ac _{min}	Ac _{max}	Ac _{min}	Ac _{max}	Ac _{min}
Banana	1.600	0	1.500	0	1.300	0
Tomate	400	0	400	0	300	0
Melancia _(es)	100	0	150	0	100	0
Feijão _(s)	400	0	600	0	400	0
Feijão _(es)	600	0	800	0	500	0
Milho _(s)	800	0	800	0	400	0
Algodão _(es)	200	0	250	0	200	0
Cana açúcar	2.000	0	1.500	0	2.500	0

v) **Dados econômicos adotados para a atividade da irrigação**

Tabela 6.26 - Custo médio de produção das culturas (incluindo energia elétrica)

Cultura	Custo de produção (R\$/ha/ano)	Cultura	Custo de produção (R\$/ha/ano)
Banana	3.139,00	Milho _(s)	1.011,00
Tomate _(s)	7.214,00	Graviola	1.922,00
Melancia _(es)	2.330,00	Goiaba	1.835,00
Melão _(es)	3.310,00	Coco anão	1.994,00
Feijão _(s)	995,50	Algodão _(es)	1.665,00
Feijão _(es)	995,50	Cana açúcar	1.379,00

Fonte: Banco do Nordeste S. A. - Manual de Orçamentos Agropecuários (2003)

Se comparados os valores da Tabela 6.26 com aqueles apresentados pelo BNB no Manual de Orçamentos Agropecuários de 1997, observa-se que para culturas como banana, melancia, melão, graviola e coco anão, os custos de produção sofreram aumentos de 149,1%; 120,8%, 122,8%, 115,2 e 146,1%, respectivamente. No geral, para o período de 1997 a 2003, verifica-se que os preços de produção das culturas selecionadas foram majorados em 96,9%, em termos médios, o que corresponde a uma taxa de aumento da ordem de 16,2% ao ano.

A Tabela 6.27 aponta os preços médios de comercialização das culturas considerando um redutor de 30% em relação aos preços médios de atacado, base ano de 2003, comercializados no Centro de Abastecimento Alimentar de Pernambuco - CEASA/PE. Essa redução serve para compatibilizar custos de produção com custos de venda das culturas, e para representar que os últimos não estariam adicionados de custos de transporte e de intermediação na comercialização, etc., tornando a apuração da receita líquida advinda da produção agrícola irrigada mais representativa, a nível de produtor.

Tabela 6.27 - Preço médio de venda das culturas

Cultura	Preço médio de venda (R\$ / kg)	Cultura	Preço médio de venda (R\$ / kg)
Banana	0,38	Milho _(s)	0,36
Tomate _(s)	0,58	Graviola	1,48
Melancia _(es)	0,28	Goiaba	0,46
Melão _(es)	0,49	Coco anão	0,58
Feijão _(s)	0,66	Algodão _(es)	0,78
Feijão _(es)	0,92	Cana açúcar	0,03

Fonte: CEASA (PE): Preço médio real comercializado – OS Recife (2003)

No estudo, não se considera inflação de preços, atribuindo-se valor zero para a taxa anual de desvalorização da moeda. O preço médio de água aduzida para os perímetros foi considerado em R\$ 0,05/m³, mesmo que a cobrança pelo uso da água ainda não esteja em prática em Pernambuco. Segundo Silva e Wanderley (2003), propostas feitas para a cobrança da água para irrigação na bacia do rio Pirapama, cujo comitê foi o único do Estado a realizar estudos dessa natureza, recomendaram tarifas variando entre R\$ 0,08/m³ a R\$ 0,00954/m³.

6.2.5.3 - VAZÃO ECOLÓGICA

A manutenção de uma descarga mínima de saneamento para manter o rio vivo a jusante de reservatórios, principalmente no caso de rios intermitentes, passa a ser também uma exigência para auxiliar, ou até prover, a capacidade de autodepuração (ou capacidade de recuperação) desses cursos d'água. Para o rio Capibaribe, não se conhece trabalho que tenha estudado, detalhadamente, e quantificado o valor da sua capacidade de autodepuração. Segundo Salati et al. (1999), existem no Brasil poucos trabalhos sobre esse assunto, onde a dificuldade está em se conhecer com precisão as cargas poluidoras urbanas e industriais, pontuais e difusas, tanto na qualidade como na quantidade, para que se possa fazer um balanço de massa adequado dentro de um modelo de qualidade de água, o que não é do escopo deste trabalho.

O estudo de impacto ambiental do açude Jucazinho realizado pelo DNOCS, em 1992, refere que as águas da descarga de regularização para o rio Capibaribe, assim como as próprias águas da represa, podem estar sujeitas aos seguintes tipos principais de interferências:

- lançamento de esgotos provenientes da área de drenagem;
- enxurradas, arrastando material depositado na superfície do solo (adubos minerais e orgânicos, inseticidas, esterco de currais, pocilgas, granjas, lixo, excreções humanas, etc.);
- águas de infiltração de chuvas, as quais podem também conduzir sais minerais, inseticidas e outros compostos solúveis orgânicos e inorgânicos, procedentes das mesmas fontes superficiais acima mencionadas;
- infiltração de águas servidas, procedente de lançamento superficial, poços absorventes e fossas-negras, efluentes de tanques sépticos, conduzindo matérias em solução ou em suspensão, inclusive microorganismos patogênicos, como bactérias e vírus;
- lançamentos diretos de detritos gerados em piqueniques e outras atividades de diversão, e pelo uso de embarcações (óleo, gasolina, resíduos sólidos).

Como principais prejuízos que esses detritos podem causar às águas são apontados: a contaminação tóxica, biológica ou radiativa; o incremento na demanda bioquímica de oxigênio, a eutrofização, turbidez e assoreamento. A regularização de vazões a jusante de reservatórios é considerada como um impacto positivo que, pelo controle e operação de descargas de tomadas d'água, ou outros dispositivos, favorece a limpeza periódica do reservatório, pela evacuação das camadas mais inferiores da água acumulada, e regulariza uma descarga mínima de saneamento que manterá o rio vivo.

À falta de dados que permitissem avaliar a taxa global, ou mesmo taxas pontuais, de autodepuração do rio Capibaribe, estabeleceu-se uma vazão mínima a ser regularizada por cada reservatório, definida como a vazão ecológica, para simplificar a avaliação da concorrência da utilização do rio na assimilação de esgotos sanitários, em relação a outros usos mais nobres das águas dos reservatórios. Nos estudos do DNOCS, como já referido, a vazão ecológica a ser assegurada a partir do reservatório Jucazinho é de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$. Nos estudos feitos pela CISAGRO, em 1991, onde se cogitou alternativas de reforço do abastecimento de Recife a partir do reservatório Carpina, a descarga mínima de regularização foi avaliada em $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$.

Com as considerações aqui expostas, definiu-se no trabalho que a vazão ecológica a ser atendida por cada um dos reservatórios é de 0,50 m³/s. Esta vazão, tanto no ORNAP quanto no AcquaNet, é assumida de ser liberada para os rios nos meses de estiagem (setembro a fevereiro).

6.2.6 - DADOS DA PISCICULTURA

O desenvolvimento da piscicultura baseia-se em criar organismos aquáticos em condições controladas. Segundo Molle (1992), a atividade de piscicultura em águas interiores do Nordeste do Brasil é bastante atrativa em razão, entre outros, dos seguintes fatores:

- exige baixos investimentos iniciais quando já existir o açude;
- há disponibilidade de excelentes condições de luz e temperatura ambiente;
- não interfere nos demais usos da água, uma vez que a demanda correspondente, em geral, é de pequena expressão, sendo mais importantes os requisitos de qualidade da água para o desenvolvimento da atividade;
- é possível de ser praticada em áreas impróprias para a agricultura;
- não precisa de nenhuma fonte artificial de energia;
- é uma importante fonte alimentar, uma vez que o teor de proteína da carne do peixe de água doce (39 g/kg para o peixe) é duas vezes superior ao da carne de boi (19 g/kg para o boi gordo) ou galinha (18 g/kg).

Conclusões dos estudos do DNOCS (1992) para o açude Jucazinho, aqui extrapoladas para todos os reservatórios, recomendam que a implantação da piscicultura em represas requer uma atenção especial, levando em conta os seguintes aspectos:

- tipo de piscicultura a ser implantada;
- compatibilidade com a qualidade da água;
- espécies de peixes a serem introduzidas,
- estrutura a ser dada ao serviço de piscicultura.

Um programa de implantação da piscicultura, segundo o DNOCS, precisaria observar os seguintes pontos:

- em reservatórios destinados ao abastecimento d'água das populações, não pode ser praticada uma piscicultura racional do ponto de vista econômico, ou seja, voltada para

uma produção máxima, porque esta só é conseguida com um alto grau de eutrofização das águas, que é prejudicial à sua potabilidade;

- a piscicultura terá que ser praticada sem adicionamento de alimentos orgânicos nem de sais minerais, ou seja, a produção deverá ser equilibrada naturalmente com a quantidade de plânctons que se desenvolvem proporcionalmente às concentrações de sais minerais existentes no lago;
- as espécies de peixe a serem introduzidas e a sua população mantida no reservatório terão que ser cuidadosamente avaliadas em função do alimento disponível e de outros fatores ecológicos, podendo ser necessário um desbaste periódico, a fim de remover o excesso de população existente;
- o esforço de pesca terá que ser controlado, para que não seja superior à produtividade, a não ser que os peixes sejam repostos, sistematicamente, pela administração do açude.

Tomando por base as informações anteriormente expostas, a atividade piscícola nos reservatórios está avaliada no trabalho pelos critérios abordados no Capítulo 5 (item 5.2.1.3), considerada de ser desenvolvida a nível extensivo, em que são promovidas modificações mínimas no ambiente aquático. Os dados da prática da piscicultura adotados no estudo, para fins do ORNAP, são os mesmo considerados por Andrade et al. (2002), ou seja:

- custo de alevinagem (Cal) = R\$ 3,00 / ha / ano;
- produtividade média de pescado (Pdp) = 120 kg / ha / ano;
- preço médio de venda do pescado = R\$ 1,20 /kg;
- despesa média anual por pescador = 1.500 kg / pescador / ano

Os resultados da avaliação do retorno financeiro e mão de obra empregada através da piscicultura, implicitamente determinados pelo modelo ORNAP, não são usados para o modelo AcquaNet.

Na simulação do sistema hídrico, via AcquaNet, são aproveitadas as demandas hídricas mensais otimizadas obtidas pelo ORNAP para os perímetros de irrigação, considerando diferentes cenários idealizados, como se apresenta no Capítulo 7.

7 CENÁRIOS DE ESTUDO

7.1 - GENERALIDADES

Para uma melhor compreensão e avaliação mensal do comportamento do sistema hídrico, quando submetido a um conjunto de condições variáveis no tempo, foram estabelecidos cenários de referência para análise integrada da operação dos reservatórios, considerando a configuração atual, e dos perímetros irrigados idealizados. Analisa-se, de início, a operação do sistema hídrico através do modelo ORNAP, objetivando a maximização da receita líquida advinda da produção agrícola irrigada (RL) e da piscicultura extensiva nos reservatórios (RI), para determinar demandas hídricas mensais dos perímetros irrigados, com base nas equações, elementos e configurações apresentados nas Seções 5.2.1 e 5.3.1 do Capítulo 5, além de outras condições próprias da irrigação, como abordadas na Seção 6.2.5.2 do Capítulo 6.

As demandas do abastecimento humano são tornadas fixas ao longo do ano, sendo obrigatório o seu atendimento. As demandas hídricas mensais dos perímetros irrigados são avaliadas pelo ORNAP para duas situações climáticas distintas - média e seca, impondo-se ao problema, como outra restrição operacional, o respeito ao critério da sustentabilidade hídrica dos reservatórios, determinado pela condição de que o volume dos reservatórios, ao final do último mês do período de cálculo, seja igual ou maior ao volume inicial (V_{ro}) adotado no primeiro mês do processo. A partir das demandas hídricas mensais otimizadas para cada perímetro irrigado, que correspondem à apuração de receitas líquidas e áreas irrigadas máximas ótimas, é simulada a operação mensal do sistema hídrico pelo uso do modelo AcquaNet, considerando as mesmas condições climáticas estabelecidas, agregando-se vazões para o abastecimento, vazões afluentes, taxas de evaporação e volumes mínimos nos reservatórios, além da definição de prioridades em cenários específicos, conforme se descreve na seção 7.4 deste Capítulo 7.

7.2 - SITUAÇÕES CLIMÁTICAS

A complexidade do fenômeno seca, com suas diferentes causas e efeitos, pode ser a razão pela qual há na literatura tantas definições diferentes para ele. Do ponto de vista meteorológico, a seca está presente quando a quantidade de precipitação ocorre abaixo de um

estipulado nível crítico, geralmente o valor médio, durante um certo período (Correia, 1991). Do ponto de vista hidrológico, a seca pode ser entendida como a insuficiência de águas nos rios ou reservatórios para atendimento das demandas de águas já estabelecidas em uma dada região. O resultado desse tipo de seca é o racionamento, ou colapso, em sistemas de abastecimento d'água das cidades ou das áreas de irrigação (Sólon et al., 2001).

Para fins deste estudo, com base nos dados das séries de totais anuais de precipitação calculadas para os reservatórios e perímetros de irrigação, foram caracterizadas situações climáticas distintas para o sub-sistema Jucazinho-Carpina e sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una.

• Sub-Sistema Jucazinho-Carpina

Com base na série de totais anuais de precipitação para o período 1957-1992 (36 anos), foram caracterizadas as seguintes situações climáticas: i) situação climática média, que é representada pela série de precipitações médias mensais do período 1957-1992, compatibilizada no processo de otimização com as correspondentes séries de vazões médias mensais afluentes aos dois reservatórios; ii) situação climática seca, que é representada pela série de precipitações médias mensais do período 1957-1960, compatibilizada no processo de otimização com as correspondentes séries de vazões médias mensais afluentes aos reservatórios. As Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 apresentam valores de precipitação média mensal e total anual para o sub-sistema formado pelos reservatórios Jucazinho e Carpina, e para os perímetros de irrigação Trapiá, Carpina e Várzeas-Passira, considerando as duas situações climáticas.

Para os sub-sistemas hídricos em estudo (Jucazinho-Carpina e Tapacurá-Goitá-Várzea do Una) a definição dos anos considerados secos foi obtida utilizando-se valores da média e do desvio padrão calculados para as séries de totais de precipitação anual consideradas, conforme critério aplicado por Barbosa et al. (2001). Considera-se um ano como seco quando a precipitação total anual, P , é menor que a média, X , da amostra menos o desvio padrão, (S) , dividido por dois (se $P < X - S/2$, implica em considerar o ano como seco).

Tabela 7.1 - Precipitação no sub-sistema formado pelos reservatórios Jucazinho e Carpina

Situação climática	Precipitação (mm)												
	Média mensal												Total anual
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Média	36,9	51,8	109,8	105,0	81,8	88,5	90,4	38,1	24,8	11,7	9,7	22,9	671,4
Seca	14,6	33,2	125,2	65,3	70,8	78,9	65,8	30,7	15,7	6,3	5,3	7,3	519,1

Tabela 7.2 – Precipitação (mm) nos perímetros irrigados na situação climática média

Perímetro.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total anual
Trapiá	28,4	34,1	84,4	87,7	100,6	100,9	86,2	44,6	23,0	14,2	14,7	22,8	641,6
Carpina	35,3	54,8	113,6	135,6	161,4	178,6	154,7	84,0	39,6	20,8	19,3	30,8	1.063,8
Várzeas Passira	32,3	50,1	106,2	119,8	122,2	147,7	129,8	65,4	35,4	19,7	20,5	25,2	874,3

Tabela 7.3 - Precipitação (mm) nos perímetros irrigados para a situação climática seca

Perímetro.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total anual
Trapiá	5,0	16,7	106,5	49,9	65,6	67,7	71,9	22,8	17,7	6,2	4,0	3,4	437,4
Carpina	31,9	27,8	140,0	154,7	126,3	190,2	164,5	111,1	25,0	13,5	5,3	16,3	1.006,1
Várzeas Passira	25,6	48,2	118,4	111,9	117,7	120,6	121,1	61,7	25,6	13,6	6,2	13,7	748,8

Nas Tabelas 7.2 e 7.3, os dados de precipitação média mensal em cada perímetro irrigado do sub-sistema Jucazinho-Carpina, ou seja Trapiá, Carpina e Várzeas-Passira, para as situações média e seca, dizem respeito aos postos pluviométricos de Algodão do Manso, Carpina e Salgadinho, respectivamente.

• Sub-Sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una

Com base nos dados de precipitação da série 1968-1989, foram caracterizadas as situações climáticas: i) situação climática média, representada pela série de precipitações médias mensais para o período 1968-1989, compatibilizada no decorrer do processo de otimização com as correspondentes séries de vazões médias mensais afluentes a cada reservatório; ii) situação climática seca, que é representada pela média da série de precipitações médias mensais dos anos 1968-1971, compatibilizados esses valores no processo de otimização com as correspondentes séries de vazões médias mensais afluentes.

Os dados de precipitação média mensal sobre os reservatórios, obtidos a partir do método de Thiessen, estão apresentados na Tabela 7.4 e dizem respeito aos postos pluviométricos de Vitória de Santo Antão (para o Tapacurá), Chã de Alegria (para o Goitá) e Bela Rosa (para o reservatório Várzea do Una).

Os dados de precipitação média mensal de cada perímetro irrigado do sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una, seja nas situações média e seca, estão apresentados nas Tabelas 7.5 e 7.6. Esses dados dizem respeito aos postos pluviométricos de Vitória de Santo Antão (perímetro Tapacurá), Chã de Alegria (perímetro Goitá) e Nossa Senhora da Luz (perímetro Várzea do Una).

Tabela 7.4 - Precipitação nas situações climáticas média e seca para os reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una

Reservatório Tapacurá (precipitação em mm)													
Situação climática	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total anual
Média	43,9	50,5	132,3	163,8	142,8	183,1	213,7	78,4	47,1	22,9	31,7	40,4	1150,6
Seca	29,3	22,9	90,8	75,6	134,7	89,1	127,6	51,8	39,7	39,4	17,9	25,6	743,9
Reservatório Goitá (precipitação em mm)													
Situação climática	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total anual
Média	49,4	53,1	128,2	155,2	148,7	169,5	195,6	81,9	44,9	19,8	26,8	34,4	1107,5
Seca	60,1	24,8	61,5	60,7	133,1	78,9	119,2	50,2	45,3	28,9	17,6	25,0	705,3
Reservatório Várzea do Una (precipitação em mm)													
Situação climática	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total anual
Média	63,1	57,3	129,9	180,1	158,9	195,9	220,6	97,9	59,7	32,6	32,3	41,1	1269,4
Seca	114,6	30,2	120,3	105,1	182,5	89,5	142,6	67,4	47,5	49,1	22,9	25,6	997,3

Tabela 7.5 - Precipitação (mm) nos perímetros para a situação climática média

Perímetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total anual
Tapacurá	42,1	57,2	149,4	162,7	150,4	201,5	220,8	86,7	55,1	32,7	42,3	47,5	1284,4
Goitá	51,5	63,6	138,9	200,6	221,5	240,4	230,6	93,3	50,2	19,8	36,2	27,8	1374,4
V. Una	79,5	71,7	178,7	262,3	227,5	278,9	305,7	135,5	83,0	45,3	43,3	53,3	1764,7

Tabela 7.6 - Precipitação (mm) nos perímetros para a situação climática seca

Perímetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total anual
Tapacurá	28,9	11,3	78,7	96,9	120,8	107,7	103,4	60,7	49,5	23,1	11,4	14,6	707,0
Goitá	59,6	107,9	108,5	129,0	91,6	97,0	147,2	36,0	7,8	13,2	0,0	0,0	797,8
V. Una	122,6	57,2	111,2	123,1	221,4	87,8	206,6	73,2	47,5	66,0	9,2	28,5	1154,3

7.3 - CENÁRIOS IDEALIZADOS PARA O ORNAP

Para compreensão e análise do desempenho operacional do sistema de reservatórios, foi feita uma abordagem determinística onde se imaginou o futuro como conhecido através de cenários de planejamento. Para o sub-sistema Jucazinho-Carpina, os cenários têm por base a estruturação desse sub-sistema como apresentada na Figura 5.4 do Capítulo 5. Para o sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una, os cenários têm por base a estruturação apresentada na Figura 5.5 do Capítulo 5.

7.3.1 - SITUAÇÕES OPERACIONAIS DOS RESERVATÓRIOS

- **Sub-Sistema Jucazinho-Carpina** - convencionou-se iniciar o processo de cálculo no mês de maio, instante em que os reservatórios recebem, normalmente, as maiores afluências, sendo fixados: i) para o reservatório Jucazinho, os volumes iniciais (V_{ro}) de 227,036 hm^3 e 163,517 hm^3 , correspondentes a 69% e 50% do volume de acumulação V_{rmax} projetado, respectivamente; ii) para o reservatório Carpina, os volumes iniciais (V_{ro}) de 100,000 hm^3 e 81,000 hm^3 , correspondentes a 37% e 30% do volume de acumulação V_{rmax} projetado, respectivamente.
- **Sub-Sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una** - convencionou-se iniciar o processo de cálculo no mês de julho, instante em que os reservatórios recebem, normalmente, as maiores afluências, sendo fixados: i) para o reservatório Tapacurá, volumes iniciais (V_{ro}) de 78,960 hm^3 e 49,350 hm^3 , correspondentes a 80% e 50% do volume de acumulação V_{rmax} projetado, respectivamente; ii) para o reservatório Goitá, volume inicial (V_{ro}) de 26,500 hm^3 , correspondendo a 50% do volume de acumulação V_{rmax} projetado, e iii) para o reservatório Várzea do Una, volumes iniciais (V_{ro}) de 9,280 hm^3 e 5,800 hm^3 , correspondentes a 80% e 50% do volume de acumulação V_{rmax} projetado, respectivamente.

7.3.2 - PRESSUPOSTOS OBSERVADOS NO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Nas situações operacionais idealizadas para o sistema hídrico, com base no ORNAP, foram observados os seguintes pressupostos: i) os resultados do processo de otimização estão definidos para um período de doze (12) meses, baseados nas séries de valores médios mensais de pluviometria e de vazões médias mensais afluentes aos reservatórios; ii) fez-se obrigatório o atendimento prioritário das demandas fixadas para o abastecimento urbano, exigida a sustentabilidade hídrica dos reservatórios; iii) no alto e médio Capibaribe as maiores cheias se concentram no período de maio a julho (para o reservatório de Jucazinho, preserva-se o volume de espera de 100,0 hm^3 nos meses de maio e junho; para o Carpina, preserva-se o volume de espera de 170,0 hm^3 nos meses de junho e julho; para o reservatório Goitá, foi considerado o volume de espera de 26,0 hm^3 a ser preservado no mês de julho; iv) No balanço hídrico dos reservatórios, não são consideradas perdas por infiltração; v) Os planos culturais anuais estabelecidos para cada área irrigável, conforme apresentados na seção 6.2.5.2.3 do Capítulo 6, são mantidos invariáveis em todas as situações estudadas; as culturas permanentes

estão consideradas como culturas em plena capacidade de produção; vi) No cálculo das demandas de irrigação, adotando-se lâminas de irrigação fixas, considerou-se não existir: dotação por capilaridade na zona radicular das plantas, reserva de água no solo no princípio de cada mês, e também dotações de água para lixiviação de sais no solo, embora esse seja um fator importante de ser considerado em projetos de irrigação, mormente em regiões semi-áridas.

7.3.3 - DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS

7.3.3.1 - SUB-SISTEMA JUCAZINHO-CARPINA

Foram testados quatro (04) cenários envolvendo a situação climática média caracterizados pelas siglas Cm1, Cm2, Cm3 e Cm4. Para a situação climática seca foram testados dois (02) cenários - Cs1 e Cs2. Os parâmetros básicos dos cenários estão apresentados na Tabela 7.7. As siglas Cm e Cs passam a ser referenciais permanentes para o entendimento das análises e discussão de resultados, onde os índices “m” e “s” traduzem se o cenário testado está para a situação climática média ou seca, respectivamente.

Tabela 7.7 - Cenários no ORNAP para o Sub-Sistema Jucazinho-Carpina

Parâmetro Operacional	Un.	Situação climática					
		Média (período 1956 - 1992)				Seca (período 1957 - 1960)	
		Cenário				Cenário	
		Cm1	Cm2	Cm3	Cm4	Cs1	Cs2
Vrmax(1)	hm ³	327,035	327,035	327,035	327,035	327,035	327,035
Vrmax(2)	hm ³	270,000	270,000	270,000	270,000	270,000	270,000
Vro(1)	hm ³	0,69Vrmax	0,69Vrmax	0,50Vrmax	0,50Vrmax	0,69Vrmax	0,50Vrmax
Vro(2)	hm ³	0,37Vrmax	0,37Vrmax	0,37Vrmax	0,30Vrmax	0,37Vrmax	0,30Vrmax
Vrmin(1)	hm ³	16,811	16,811	16,811	16,811	16,811	16,811
Vrmin(2)	hm ³	1,509	1,509	1,509	1,509	1,509	1,509
Vsust(1)	hm ³	Vro	Vro	Vro	Vro	Vro	Vro
Vsust(2)	hm ³	Vro	Vro	Vro	Vro	Vro	Vro
Vesp(1)	hm ³	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	0
Vesp(2)	hm ³	170,000	170,000	170,000	170,000	170,000	0
Qd1	m ³ /s	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Qd2	m ³ /s	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0

(1) Reservatório Jucazinho ; (2) Reservatório Carpina

Para uma melhor compreensão da Tabela 7.7, explica-se: i) Vrmax, é o volume máximo mensal permitido para o reservatório; ii) Vro, é o volume estimado do reservatório para início do processo de otimização; iii) Vrmin, é o volume mínimo que permite uma boa operação

hidráulica da tomada d'água; iv) V_{sust} , é o volume mínimo para a sustentabilidade hídrica do reservatório, em que V_{final} do último mês da simulação $\geq V_{inicial}$ do primeiro mês da simulação; v) V_{esp} , é o volume de espera de cheia; vi) $Qd1$, é a vazão de projeto da adutora de Jucazinho, e vi) $Qd2$, é a demanda suposta de ser atendida pelo reservatório Carpina para reforço do abastecimento de água do Recife, via sistema Tapacurá.

7.3.3.1.1 - OUTROS DADOS DE ENTRADA

Para a situação climática média, os cenários Cm1, Cm2, Cm3 e Cm4 são diferenciados, basicamente, pelos volumes iniciais adotados para os reservatórios. Exceção se faz para as vazões testadas para reforço do abastecimento de água de Recife, como seja: nos cenários Cm1 e Cm3, essa vazão é de $1,5\text{m}^3/\text{s}$; já no Cm2 e Cm4, ela passa para $1,0\text{m}^3/\text{s}$. Embora todos os dados utilizados no estudo sejam inerentes aos reservatórios, perímetros irrigados, culturas agrícolas, piscicultura, e sistemas de irrigação, etc., já tenham sido considerados no Capítulo 6, vale destacar alguns deles, como a seguir.

(i) Para o reservatório Jucazinho

- Vazão média mensal afluyente (Q_a) ao reservatório ($\text{m}^3/\text{mês}$), conforme Tabela 7.8;
- Vazão de regularização de $2,00\text{m}^3/\text{s}$;
- Descarga mensal máxima de $1.000\text{m}^3/\text{s}$, visando não provocar inundações a jusante;
- Vazão ecológica de $0,50\text{m}^3/\text{s}$ a ser liberada para o rio nos meses de estiagem normal, ou seja de setembro a fevereiro;
- Demanda fixa para abastecimento urbano definida em $1,80\text{m}^3/\text{s}$;
- Cota mínima mensal do reservatório igual a 256 m, visando a boa operação hidráulica da tomada de água para irrigação do perímetro Trapiá;
- Vazão mensal máxima da tomada para Trapiá, definida em $4,0\text{m}^3/\text{s}$;
- Lâmina vertente mensal máxima sobre o vertedouro principal igual a 6,0 m;
- Largura do vertedouro principal igual a 170 m;
- Cota da soleira do vertedouro principal igual a 292 m;
- Largura de cada vertedouro auxiliar igual a 114 m;
- Cota da soleira do vertedouros auxiliares igual a 295 m;
- Lâmina vertente mensal máxima sobre vertedouros auxiliares igual a 3,0 m;
- Área da seção circular do descarregador (Dispensor), de valor $3,142\text{m}^2$;
- Coeficiente de vazão do descarregador (Dispensor), de valor 0,80;
- Cota do nível de água na saída do descarregador, de valor 251 m;

(ii) Para o reservatório Carpina

- Vazão média mensal afluyente (Q_a) ao reservatório ($m^3/mês$), conforme Tabela 7.8;
- Vazão ecológica de $0,50 m^3/s$, a ser liberada para o rio nos meses de estiagem, ou seja de setembro a fevereiro;
- Vazão mensal máxima de $300 m^3/s$, que pode ser descarregada pelo reservatório na calha do rio, compatível com a função atribuída à barragem Carpina no contexto do conjunto de obras destinado à proteção da cidade do Recife contra inundações;
- Cota mínima mensal do reservatório igual a 90m, visando boa operação hidráulica da tomada d'água para irrigação do perímetro Carpina, e da tomada d'água para adução de vazão de reforço para abastecimento do Recife;
- Vazão mensal máxima da tomada d'água para o perímetro Carpina, assumida em $4,0 m^3/s$;
- Vazão mensal máxima da tomada d'água para reforço do abastecimento do Recife, assumida em $3,0 m^3/s$;
- Largura do vertedouro igual a 400 m; Cota da soleira do vertedouro igual a 118 m;
- Lâmina vertente mensal máxima sobre o vertedouro igual a 3,0 m;
- Área da seção circular de uma descarga de fundo, de valor $15,90 m^2$;
- Coeficiente de vazão da descarga de fundo, assumido 0,4766, e
- Cota do nível d'água na saída da descarga de fundo igual a 83,30 m;

Tabela 7.8 – Vazões médias mensais afluentes em Jucazinho e Carpina (sit. climática média)

Mês	Jucazinho	Carpina
	Q_a ($m^3/mês$)	Q_a ($m^3/mês$)
Janeiro	1.065.312	918.200
Fevereiro	5.132.160	842.600
Março	36.995.712	11.802.400
Abril	47.998.656	17.713.600
Mai	21.360.672	12.084.200
Junho	15.500.160	13.471.800
Julho	28.623.456	32.170.400
Agosto	7.055.424	8.785.200
Setembro	2.490.912	2.583.000
Outubro	855.360	955.200
Novembro	326.592	373.000
Dezembro	3.040.416	576.200
Total anual	169.052.832	102.276.200

Nos cenários Cs1 e Cs2, a vazão de reforço para abastecimento de Recife é de $1,0 m^3/s$. Nestes cenários, os dados são os mesmos apresentados no Capítulo 6, fazendo-se exceção para os valores de vazão média mensal afluyente (Q_a) aos reservatórios, que estão apresentadas na Tabela 7.9. No cenário Cs2 não se preserva volume de espera nos reservatórios.

Tabela 7.9 - Vazões médias mensais afluentes em Jucazinho e Carpina (sit. climática seca)

Mês	Jucazinho	Carpina
	Qa (m ³ /mês)	Qa (m ³ /mês)
Janeiro	130.100	161.800
Fevereiro	111.300	154.200
Março	67.231.296	19.566.300
Abril	20.365.344	16.863.400
Mai	7.229.088	7.546.000
Junho	6.832.512	5.759.400
Julho	5.357.664	6.680.000
Agosto	2.625.696	5.297.800
Setembro	1.845.504	2.168.400
Outubro	127.700	226.600
Novembro	127.300	213.600
Dezembro	59.200	158.200
Total anual	112.041.000	64.795.400

7.3.3.2 - SUB-SISTEMA TAPACURÁ-GOITÁ-VÁRZEA DO UNA

Foram adotados três (3) cenários para a situação climática média: Cm5, Cm6, Cm7. Na situação climática seca, foram idealizados dois cenários: Cs3 e Cs4. A Tabela 7.10 sintetiza os parâmetros básicos adotados para estes cenários.

Tabela 7.10 - Cenários no ORNAP para o Sub-Sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una

Parâmetro Operacional	Un.	Situação climática				
		Média (período 1968 - 1989)			Seca (período 1968 - 1971)	
		Cenário			Cenário	
		Cm5	Cm6	Cm7	Cs3	Cs4
Vrmax(1)	hm ³	98,700	98,700	98,700	98,700	98,700
Vrmax(2)	hm ³	53,000	53,000	53,000	53,000	53,000
Vrmax(3)	hm ³	11,600	11,600	11,600	11,600	11,600
Vro(1)	hm ³	0,80Vrmax	0,50Vrmax	0,50Vrmax	0,80Vrmax	0,80Vrmax
Vro(2)	hm ³	0,50Vrmax	0,50Vrmax	0,50Vrmax	0,50Vrmax	0,50Vrmax
Vro(3)	hm ³	0,80Vrmax	0,80Vrmax	0,50Vrmax	0,80Vrmax	0,50Vrmax
Vrmin(1)	hm ³	2,200	2,200	2,200	2,200	2,200
Vrmin(2)	hm ³	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810
Vrmin(3)	hm ³	0,671	0,671	0,671	0,671	0,671
Vsust(1)	hm ³	Vro	Vro	Vro	Vro	Vro
Vsust(2)	hm ³	Vro	Vro	Vro	Vro	Vro
Vsust(3)	hm ³	Vro	Vro	Vro	Vro	Vro
Vesp(1)	hm ³	-	-	-	-	-
Vesp(2)	hm ³	26,000	26,000	26,000	26,000	0
Vesp(3)	hm ³	-	-	-	-	-
Qd1 e Qd3	m ³ /s	4,0	4,0	4,0	3,0	3,0
Qd2	m ³ /s	-	-	-	-	-

(1) Reservatório Tapacurá ; (2) Reservatório Goitá; (3) Reservatório Várzea do Una.

Para os três reservatórios, os dados para cálculo de vazões mensais aduzidas pelas tomadas d'água para abastecimento e irrigação, descarregadores e vertedouros, estão apresentados nas Tabelas 6.10 a 6.13 do Capítulo 6. Dados inerentes aos perímetros irrigados, culturas agrícolas, piscicultura, e sistemas de irrigação, etc., também foram considerados no Capítulo 6. Define-se uma descarga mensal máxima de 150,00 m³/s, visando não provocar inundações a jusante dos reservatórios. Deve ser atendida pelos reservatórios a vazão ecológica de 0,50 m³/s, a ser liberada para o rio nos meses de estiagem normal, ou seja de setembro a fevereiro.

O volume de espera de 26 hm³, definido para o reservatório Goitá, deve ser preservado no mês de julho, a exceção do cenário Cs4 onde não se apropria volume de espera. Na situação climática seca - cenários Cs3 e Cs4, os dados do sub-sistema hídrico, além dos constantes das Tabelas 7.4, 7.6 e 7.10, são aqueles específicos apresentados no Capítulo 6. A vazão para abastecimento urbano se reduz para 3,0 m³/s, visto o risco do não atendimento da vazão de 4,0 m³/s como já aconteceu em passado recente, conforme comentado na seção 4.1 do Capítulo 4.

7.4 - CENÁRIOS IDEALIZADOS PARA O ACQUANET

A simulação da operação integrada dos cinco reservatórios e perímetros, considerando o aproveitamento de resultados da otimização, envolve muitos dos dados de entrada indicados no Capítulo 6, que são comuns tanto para uso do ORNAP quanto para aplicação no AcquaNet. Foram pré-estabelecidos cenários prospectivos para análise de situações que incorporam aspectos de ordem climática, física, hídrica, ambiental e operacional. Para compatibilizar as séries hidrológicas mensais disponíveis, visando a entrada de dados a serem associados a cada elemento da representação física do sistema hídrico no AcquaNet, foi definido o período de 1968 a 1989 (264 meses), comum ao sub-sistema Jucazinho-Carpina e ao sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una.

Na simulação da operação integrada do sistema hídrico, utiliza-se como dado de entrada básico, no que tange às demandas da irrigação, as vazões médias mensais otimizadas para cada perímetro que correspondam às maiores receitas líquidas otimizadas nos cenários testados pelo ORNAP, tanto na situação climática média quanto na seca. No AcquaNet, as demandas são fixadas para cada mês do ano, encarregando-se o modelo de buscar atendê-las, dentro das restrições especificadas.

A rede de fluxo representada na figura anterior é composta de vinte e um (21) nós e vinte e vinte (20) arcos. Esclarece-se que para o nó EEAB Tiúma-Castelo (EEAB - Estação Elevatória de Água Bruta) não se considera o aporte de vazões naturais advindas da sub-bacia não controlada pelos reservatórios, a jusante de cada um deles.

Na simulação pelo AcquaNet, simplifica-se no sentido de que para o nó EEAB Tiúma-Castelo somente afluam contribuições de vazões mínimas a serem mantidas na calha dos rios, a jusante dos cinco reservatórios.

O desempenho das captações Tiúma e Castelo, como já se comentou na Seção 4.1 do Capítulo 4 permanece, desde a sua implantação, com oscilações constantes onde o valor médio bombeado atinge apenas cerca 70% da capacidade de projeto, mesmo em períodos de normalidade climática.

Na tentativa de assegurar uma adução firme de reforço do abastecimento do Recife, através das EEAB Tiúma-Castelo, são testadas vazões regularizadas de 1,5 m³/s e 1,0 m³/s para o rio Capibaribe, a partir do reservatório Carpina, considerada uma acumulação de 100,00 hm³, como previsto também no modelo de otimização.

Tabela 7.12 – Descrição do nós da rede fluxo do sistema hídrico no AcquaNet

Nó	Tipo	Nome do Nó (Destinação)	V _{max} (hm ³)	V _{mig} (hm ³)	Demanda média (m ³ /s)
1	Demanda	Abast. JUCAZ (45 localidades)	-	-	1,80
2	Demanda	Irrig Trapiá (irrigação do perímetro)	*	*	*
3	Reservatório	Jucazinho (entrada de vazões)	327,035	16,811	
4	Ponto de passagem	N4-26 (entrada de vazões, derivação)		-	*
5	Demanda	IrrigVzPassira (irrigação do perímetro)	*	*	*
6	Reservatório	Carpina (entrada de vazões)	270,000	1,509	-
7	Demanda	IrrigCarpina (irrigação do perímetro)	*	*	*
8	Ponto de passagem	ConflCapibGoita (confluência de rios)	-	-	-
9	Reservatório	Goitá (entrada de vazões)	53,000	0,810	-
10	Demanda	IrrigGoitá (irrigação do perímetro)	*	*	*
11	Ponto de passagem	ConflCapibTapac (confluência de rios)	-	-	-
12	Ponto de passagem	ConflTapacVzUna (confluência de rios)	-	-	-
13	Reservatório	Tapacurá (entrada de vazões)	98,700	2,200	-
14	Demanda	Irrig. Tapacurá (irrigação do perímetro)	*	*	*
15	Demanda	Abast. Recife 1 (vazão para a ETA)	-	-	2,20 a 2,00
16	Reservatório	Várzea do Una (entrada de vazões)	11,600	0,671	-
17	Demanda	Abast. Recife 2 (vazão para a ETA)	-	-	0,50
18	Demanda	IrrigVzUna (irrigação do perímetro)	*	*	*
19	Ponto de passagem	EEAB Tiúma/Castelo (captações)	-	-	-
20	Demanda	Abast. Recife 3 (vazão para a ETA)	-	-	1,50 a 1,00
21	Demanda	Final Mar (ponto final da rede)	-	-	2.500,00 #

* A dependência dos resultados do modelo de otimização ORNAP; # - Demanda fictícia.

Tabela 7.13 – Descrição dos arcos da rede fluxo do sistema hídrico no AcquaNet

Arco	Nome do Arco / Correspondência Física	Limites (m ³ /s)	
		Máximo	Mínimo
1	Adutora 1: Sistema adutor de água tratada de Jucazinho	2,00	1,80
2	Adutora 2: adutora fictícia para o perímetro Trapia	4,00	0,00
3	RioCapib 1: trecho do rio Capibaribe a jusante da barragem de Jucazinho	1.000,00	0,50
4	Adutora 3: adutora fictícia para o perímetro Várzeas/Passira	4,00	0,00
5	RioCapib 2: trecho do rio Capibaribe a jusante da derivação da Adutora3	1.000,00	0,50
6	Adutora 4: adutora fictícia para o perímetro Carpina	4,00	0,00
7	RioCapib 3: trecho do rio Capibaribe a jusante da barragem Carpina	300,00	1,50
8	Rio Goitá: trecho do rio Goitá a jusante da barragem de mesmo nome	100,00	0,50
9	Adutora 6: adutora fictícia para o perímetro Goitá	3,00	0,00
10	RioCapib 4: trecho do Capibaribe a jusante da confluência com rio Goitá	400,00	1,50
11	RioTapac: trecho do Tapacurá, a montante da confluência do Capibaribe	150,00	0,50
12	RioTapac 2: trecho do Tapacurá a jusante da barragem de mesmo nome	150,00	0,50
13	Adutora 7: adutora fictícia para o perímetro Tapacurá	3,00	0,00
14	Adutora 8: adutora para a ETA / abastecimento de Recife	2,40	2,00
15	Rio VUna: trecho do rio Várzea do Una a jusante da barragem	10,00	0,50
16	Adutora 9: adutora fictícia para o perímetro Várzea do Una	0,90	0,00
17	Adutora 10: adutora para a ETA / abastecimento de Recife	0,54	0,50
18	RioCapib 5: trecho do Capibaribe a jusante da confluência do Tapacurá	600,00	1,50
19	Adutora 11: Captações Tiúma-Castelo para a ETA/abastecimento de Recife	1,50	0,50
20	RioCapib 6: trecho do rio Capibaribe a jusante das EEAB Tiúma-Castelo	700,00	0,50

7.4.1 - SITUAÇÕES OPERACIONAIS DOS RESERVATÓRIOS

No presente trabalho, aplicou-se o modelo AcquaNet na sua forma denominada de *Simulação Contínua*, compatível com os aspectos de planejamento de recursos hídricos em longo prazo, e não para respostas previsionais para curtos períodos de tempo. Na simulação contínua, parte-se dos volumes iniciais armazenados nos reservatórios, e a definição de volumes metas, obtendo-se como resultado a disponibilidade de água para as diversas demandas do sistema, associadas a seus respectivos graus de confiabilidade. A simulação é dita contínua porque o modelo executa os cálculos da seguinte maneira:

- No primeiro ano, o modelo parte de uma condição de reservação inicial fornecida e efetua o cálculo, mês a mês (o volume no final do mês passa a ser o volume inicial do mês seguinte), até o final deste ano;
- No segundo ano, parte-se com volumes iniciais iguais aos volumes finais do ano anterior;
- O procedimento é repetido até o ano final da série, e
- Os resultados da simulação são fornecidos mensalmente para todos os anos.

Para o modelo AcquaNet efetuar os cálculos com os valores de entrada fornecidos, faz-se a simulação contínua para a opção de cálculo *calibração*, considerando os dados pertinentes às situações climáticas, média e seca, adotadas no estudo, levando em conta os mesmos limites físicos dos reservatórios estabelecidos para o ORNAP, como apontados na Tabela 7.12.

7.4.2 - DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS

A possibilidade de determinação de prioridades é um dos recursos interessantes do AcquaNet, e também o que oferece maior sensibilidade ao modelo, ou seja, a sua variação tende a fornecer resultados completamente diferentes para uma mesma topologia, exigindo critérios bem ajustados para sua utilização. O modelo de simulação atenderá as demandas de acordo com um valor de prioridade atribuída, que pode variar de 1 a 99, como já mencionado no Capítulo 5. Se a prioridade Pr da demanda final (Final Mar) for baixa, com valor máximo de 99, como será adotado, significa que o seu atendimento não competirá com as demais demandas alocadas para o sistema, e grande parte das disponibilidades hídricas poderá ser armazenada nos reservatórios, desde que outras prioridades de menor valor na rede de fluxo já tenham sido atendidas.

Os cenários foram então criados a partir da variação das prioridades para cada elemento do sistema, sejam eles demandas ou reservatórios, valendo tanto para a situação climática média como na situação climática seca. Obviamente, a demanda do abastecimento tem prioridade de atendimento superior à vazão ecológica, seguida pelas prioridades a serem conferidas para a irrigação, que deve ter prioridade inferior às primeiras. Como a piscicultura gera menos renda e mão de obra do que a agricultura irrigada, as prioridades para volumes metas nos reservatórios terão que ser inferiores às prioridades da irrigação, da vazão ecológica e do abastecimento, nessa seqüência.

Como os cenários de irrigação criados para o ORNAP foram diferenciados em cada subsistema hídrico (Jucazinho-Carpina; Tapacurá-Goitá-Várzea do Una), e em cada um dos subsistemas tem-se três (03) perímetros irrigados, foi estabelecido uma combinação de três prioridades diferentes para a irrigação de cada um deles, mantidas constantes as prioridades das demais demandas, como se apresenta na Tabela 7.14. Nessa tabela, os números Pr significam ordem de satisfação. Quanto menor o valor de Pr , maior será a prioridade em atender uma determinada demanda.

Na Tabela 7.14, como recomendado por Graham, Labadie, Hutchison e Ferguson (1986), os valores das prioridades foram escolhidos arbitrariamente, com o valor de 2 para a mais alta prioridade, e um incremento de 2 pontos para a definição das demais, em ordem de importância, à exceção da demanda final (mar), que deve ser inferior a todas as outras, visando o equilíbrio de massa do sistema. Segundo esses mesmos autores, é mais importante se ter um determinado grau de classificação (*ranking*) para as prioridades, do que o valor absoluto do número selecionado, em razão da natureza linear do problema de rede de fluxo.

Tabela 7.14 - Cenários e esquemas de prioridade para alocação de água pelo AcquaNet

Demandas / Reservatórios	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1. Demandas	Prioridade (Pr)					
Abastec. humano (todos reservatórios *)	2	2	2	2	2	2
Vazão ecológica (todos os reservatórios)	4	4	4	4	4	4
Demanda final (final mar)	99	99	99	99	99	99
Irrigação do perímetro Trapia	6	6	8	8	10	10
Irrigação do perímetro Várzeas-Passira	8	10	6	10	6	8
Irrigação do perímetro Carpina	10	8	10	6	8	6
Irrigação do perímetro Goitá	6	6	8	8	10	10
Irrigação do perímetro Tapacurá	8	10	6	10	6	8
Irrigação do perímetro Várzea do Una	10	8	10	6	8	6
2. Reservatórios (volumes meta)	Prioridade (Pr)					
Jucazinho	50	50	50	50	50	50
Carpina	50	50	50	50	50	50
Tapacurá	50	50	50	50	50	50
Goitá	50	50	50	50	50	50
Várzea do Una	50	50	50	50	50	50

* Exceto para o reservatório Goitá.

Para os reservatórios, os volumes metas foram estabelecidos buscando conciliar as definições feitas para o ORNAP, observadas, por exemplo, restrições do controle de cheias, porém com uma prioridade bem inferior ao atendimento das demandas, como apresentado na Tabela 7.14. Desta forma, sempre que o volume armazenado for menor que o volume meta, o modelo AcquaNet armazenará nos reservatórios os excedentes de água, porventura disponíveis no sistema, desde que já satisfeitas as demandas com prioridades maiores que as de volumes metas.

É importante de realçar, mais uma vez, que na simulação da operação integrada do sistema hídrico, utiliza-se como dado de entrada básico, no que tange às demandas da irrigação, as vazões médias mensais otimizadas para cada perímetro que correspondam às maiores receitas líquidas obtidas entre os cenários aplicados para o modelo ORNAP, tanto na situação climática média quanto na seca, preservados os elementos definidos para os reservatórios, como volumes iniciais, volumes de controle de cheias, e demais características físicas pertinentes.

Outros dados atrelados aos cenários idealizados na Tabela 7.14, adequando-se ao que se pode obter pelas respostas do ORNAP, serão comentados à medida dos resultados que forem demonstrados no Capítulo 8 deste trabalho.

7.4.3 - SUSTENTABILIDADE

Para transformar dados dos resultados da simulação em informações relevantes à análise de desempenho do sistema hídrico, são utilizados os índices de performance - confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, como já referidos nas Seções 5.4.1 a 5.4.3 do Capítulo 5. Estes índices são importantes para o planejamento e gerenciamento de sistemas hídricos, uma vez que permitem determinar a relação entre totais retirados do sistema e as respectivas garantias, fundamentais para auxiliar no processo decisório. A partir dos resultados apurados para esses índices, será adotado o critério de sustentabilidade, como foi definido na Seção 5.4.4 do Capítulo 5 (Equação 5.33), para estabelecer quais os melhores padrões de prioridades de atendimento às demandas do sistema hídrico.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo estão apresentados e discutidos os resultados alcançados na pesquisa, iniciando-se com aqueles derivados da aplicação do modelo ORNAP para análise de otimização da operação do sistema hídrico, seguidos pelos resultados obtidos pelo uso do modelo de simulação AcquaNet e, finalmente, computados valores dos indicadores de desempenho, faz-se avaliações e classificações de preferências de cenários pela aplicação do critério de sustentabilidade. É importante lembrar que os reservatórios focados no estudo, à exceção do reservatório de Jucazinho, foram construídos sem que fossem estabelecidos mecanismos de gestão ambiental que considerassem os usos múltiplos da água.

8.1 - RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ORNAP

Os resultados da otimização estão analisados para cada situação climática, apresentando-se o desempenho dos sub-sistemas hídricos Jucazinho-Carpina e Tapacurá-Goitá-Várzea do Una. A Função Objetivo FO especificada para o ORNAP, que busca maximizar a receita líquida RL advinda da produção agrícola irrigada, é instrumento básico para a aferição do desempenho do modelo e valoração de resultados. No caso do sub-sistema Jucazinho-Carpina, por exemplo, a determinação da RL maximizada, para um período de 12 meses, ficou subordinada a seiscentas e noventa (698) equações de natureza não linear que obrigam o modelo a respeitar às limitações físicas dos reservatórios, perímetros e equipamentos hidráulicos, limitações hidrológicas, legais e econômicas, intrínsecas ao sub-sistema.

8.1.1 - RESULTADOS DO SUB-SISTEMA JUCAZINHO-CARPINA

Os resultados da otimização estão apresentados iniciando-se pelo desempenho da produção agrícola irrigada, seguido pela piscicultura, comportamento dos reservatórios e uma breve análise sobre a convergência do processo iterativo de otimização.

8.1.1.1 - RESULTADOS DO Cm1

8.1.1.1.1 - AGRICULTURA IRRIGADA

A Tabela 8.1 apresenta as áreas de plantio e receita líquida (potencial) RL anual otimizadas, por cultura e perímetro. Totalizando-se as áreas para cada cultura, no conjunto

dos três perímetros, as áreas plantadas ótimas estão apresentadas na Tabela 8.2, pela qual se observa que as culturas banana, tomate, melancia, graviola, goiaba e coco são as culturas de maior rentabilidade, sendo que a área destinada ao plantio de coco anão foi quase que completamente alocada. O modelo salvaguarda as áreas mínimas de irrigação estipuladas para culturas como feijão e algodão, segundo os planos culturais anuais adotados.

Tabela 8.1 - Área e receita líquida ótimas por cultura e perímetro no Cm1

Cultura	Perímetro						RL total por cultura (RS*10 ³)
	Trapiá		Carpina		Várzeas-Passira		
	Área (ha)	RL (RS*10 ³)	Área (ha)	RL (RS*10 ³)	Área (ha)	RL (RS*10 ³)	
Banana	30,00	351,41	293,40	3.442,70	31,93	374,23	4.168,35
Tomate _(s)	5,00	103,58	98,20	2.040,21	244,53	5.074,34	7.218,13
Melancia _(es)	nc	-	145,51	624,50	388,59	1.661,00	2.285,50
Melão _(es)	nc	-	143,66	426,73	10,00	29,43	456,15
Feijão _(s)	5,00	(-0,96)	5,00	(-0,72)	15,08	(-2,42)	(-4,11)
Feijão _(es)	10,00	1,73	5,06	1,02	2,00	0,37	3,12
Milho _(s)	11,86	17,76	197,67	303,13	489,35	745,26	1.066,15
Graviola	20,00	162,17	392,58	3.186,82	17,92	145,37	3.494,37
Goiaba	20,01	100,65	298,76	1.506,62	21,21	106,81	1.714,09
Coco anão	nc	-	390,78	8.155,70	1.477,03	30.810,29	38.965,98
Algodão _(es)	10,00	(-44,03)	nc	-	10,00	(-43,94)	(-87,98)
Área/perímetro	101,87	-	1.676,39	-	2.306,05	-	-
RL/perímetro (RS*10 ³)		692,31		19.686,70		38.900,74	-
RL total (RS)	59.279.750,00						

nc - cultura não plantada no perímetro.

Tabela 8.2 - Áreas otimizadas x áreas planejadas para os perímetros no Cm1

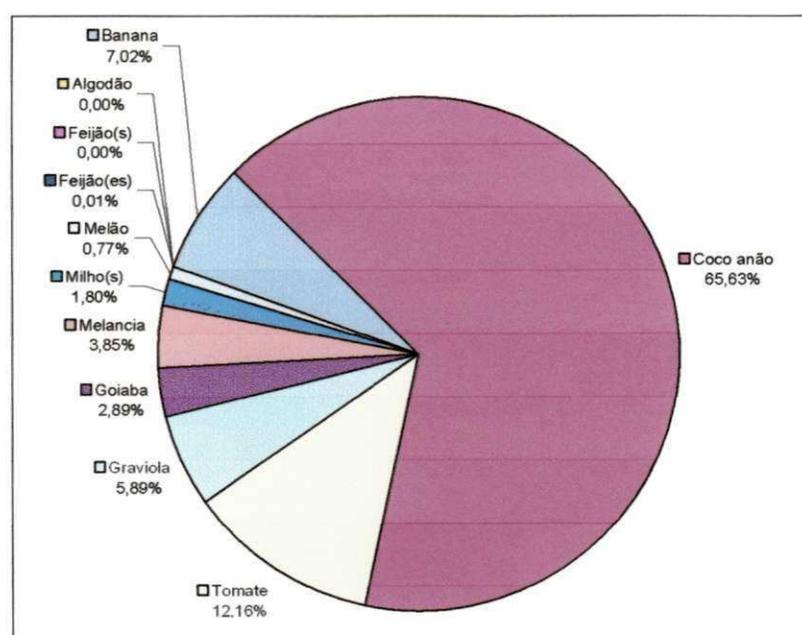
Cultura	Área máxima (ha)		Atendimento * (%)	Cultura	Área máxima (ha)		Atendimento * (%)
	Otimizada	Planejada			Otimizada	Planejada	
Banana	355,42	3.400,00	10,45	Milho _(s)	698,87	1.100,00	63,54
Tomate _(s)	347,43	650,00	53,45	Graviola	430,50	2.300,00	18,71
Melancia _(es)	534,10	550,00	97,10	Goiaba	339,98	2.700,00	12,59
Melão _(es)	153,66	550,00	27,94	Coco anão	1.867,80	1.900,00	98,31
Feijão _(s)	25,08	1.000,00	2,51	Algodão _(es)	20,00	850,00	2,35
Feijão _(es)	17,06	800,00	2,13	-	-	-	-

* O atendimento percentual (%) é o resultado de (Amax otimiz. / Amax planej.) x 100

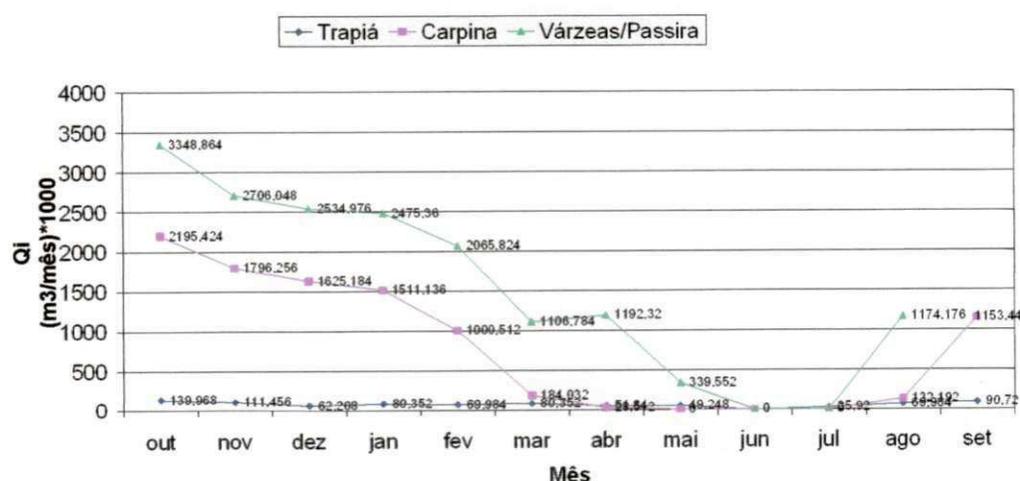
A Tabela 8.3 apresenta as áreas de plantio otimizada comparadas à área irrigável total disponível nos três perímetros. Complementando os dados da Tabelas 8.1, a Figura 8.1 apresenta a participação percentual de cada cultura na formação da receita líquida RL otimizada, considerando todos o perímetros irrigados. Chama-se a atenção para o fato que o modelo tem a flexibilidade de alocar áreas, prioritariamente, para a irrigação de culturas de maior retorno financeiro, dentro dos planos de plantio definidos.

Tabela 8.3 - Grau de utilização das áreas disponíveis de cada perímetro no Cm1

Perímetro	Área disponível (ha)	Área de plantio otimizada (ha)	Ocupação da área disponível (%)
Trapiá	4.500,00	101,87	2,26
Carpina	1.800,00	1.676,36	93,13
Várzeas e Passira	6.750,00	2.306,05	34,16
Total	13.050,00	4.084,28	31,30

**Figura 8.1** - Participação de cada cultura na formação RL anual otimizada no Cm1, considerando todos os perímetros irrigados.

A variação das vazões médias mensais demandadas para a irrigação está apresentada na Figura 8.2, observando-se que as maiores vazões estão concentradas entre os meses de setembro a fevereiro, que é o chamado período de verão na região.

**Figura 8.2** - Variação de vazões mensais demandadas pela irrigação no Cm1

A Tabela 8.4 apresenta as vazões médias mensais ótimas para os perímetros Trapiá, Carpina e Várzeas-Passira.

Tabela 8.4 - Vazões mensais ótimas para os perímetros no Cm1 (m³/s)

Perímetro Trapiá (vazão média mensal = 0,026m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,019	0,000	0,004	0,027	0,035	0,054	0,043	0,024	0,031	0,027	0,031	0,020
Perímetro Carpina (vazão média mensal = 0,309 m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,000	0,000	0,000	0,051	0,445	0,847	0,693	0,627	0,583	0,386	0,071	0,011
Perímetro Várzeas-Passira (vazão média mensal = 0,612 m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,131	0,000	0,000	0,453	0,804	1,292	1,044	0,978	0,955	0,797	0,427	0,460

8.1.1.1.2 - PISCICULTURA

Na Tabela 8.5 estão apresentados os resultados otimizados da piscicultura extensiva nos dois reservatórios. A obtenção de uma receita líquida anual Rl total de R\$135.018,11 representaria uma renda da ordem R\$1.767,05/ano/pescador. Considerando três (3) dependentes por família de pescador, essa renda geraria melhorias sócio-econômicas para cerca de 400 pessoas. A produção de pescado (produtividade média de 120 kg/ha/ano) é considerada diretamente proporcional à área mínima de espelho d'água registrada durante o ano. Para o reservatório Juczinho a menor área de espelho d' água acontece no mês de fevereiro, final do período de estiagem. Para o reservatório Carpina, isso se dá no mês de maio, quando o reservatório é deplecionado, obrigado que é nos meses de junho e julho a preservar o volume de espera, dentro da restrição imposta no estudo de otimização.

Tabela 8.5 - Resultados otimizados para a piscicultura no Cm1

Reservatório	Despesa por ano	Área mínima mensal de espelho d'água no ano (ha)	Produção anual (t)	Pescadores empregados	Receita líquida anual - Rl (R\$)
Juczinho	1	1.198,2	143,78	96	168.946,69
Carpina	1	468,6	56,23	37	66.071,42
Total			200,01	133	235.018,11

8.1.1.1.3 - COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

As variações mensais de volumes armazenados nos reservatórios Juczinho e Carpina, para o Cm1, está apresentada na Figura 8.3, pela qual é possível afirmar que: i) para Juczinho, nos meses de maio e junho, foi atendida a condição de preservação do volume de espera de 100 hm³, ou seja o volume armazenado teria que ser menor ou igual a 227 hm³; ao fim de abril,

último mês da simulação, o volume atinge 227 hm^3 , evidenciando o respeito à condição da sustentabilidade hídrica do reservatório; ii) para Carpina, nos meses de junho e julho, foi atendida a condição da preservação do volume de espera de 170 hm^3 , ou seja o volume armazenado teria que ser menor ou igual a 100 hm^3 ; iii) ao fim de abril, último mês da simulação, o volume atinge 100 hm^3 , evidenciando o respeito à condição imposta de sustentabilidade hídrica do reservatório; iv) a fase de depleção das reservas hídricas dos reservatórios se instala a partir do mês de setembro indo até fevereiro; v) não ocorreram vertimentos nos reservatórios, ficando os níveis d'água mensais sempre abaixo das cotas dos respectivos sangradouros, ou seja cota 292m ($V_{\text{rmax}} = 327,035 \text{ hm}^3$) para Jucazinho e cota 118m ($V_{\text{rmax}} = 270,0 \text{ hm}^3$) para Carpina.

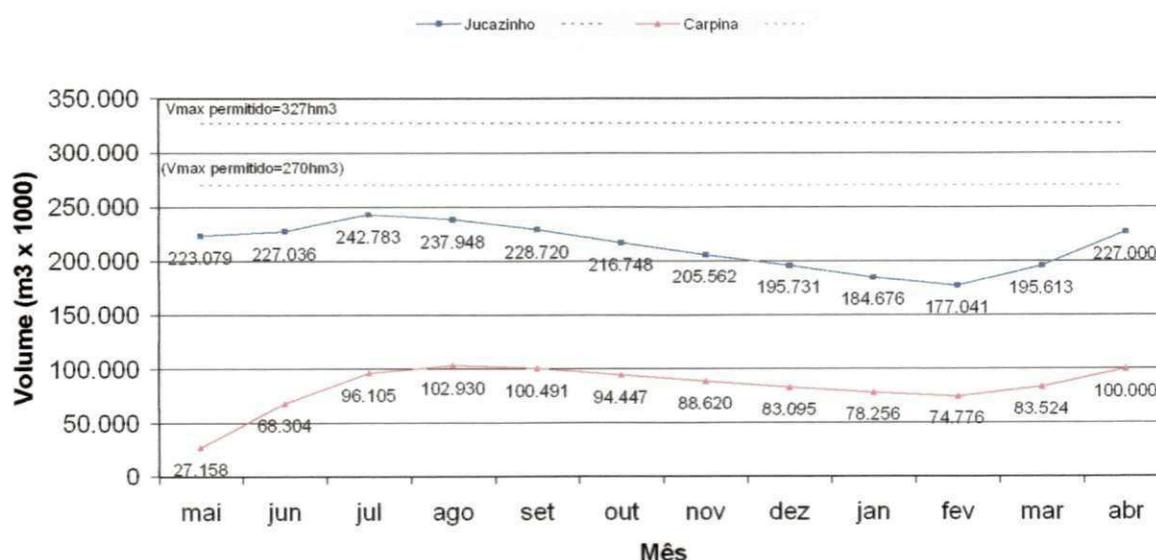


Figura 8.3 - Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cml

A Figura 8.4 apresenta as variações de volumes afluentes e de demandas mensais atendidas pelo reservatório Jucazinho, verificando-se que de setembro a fevereiro acontecem as maiores solicitações para sustentação da agricultura irrigada, elevando-se as perdas por evaporação no reservatório. A demanda fixa mensal de $1,80 \text{ m}^3/\text{s}$ destinada ao abastecimento urbano, a partir do sistema adutor de Jucazinho, é completamente atendida, mês a mês. A demanda de evaporação média mensal no reservatório foi calculada em $1,891 \text{ hm}^3/\text{mês}$, o que equivale a uma vazão de $0,73 \text{ m}^3/\text{s}$, ou a uma lâmina de evaporação média mensal da ordem de $143,0\text{mm}$.

A Figura 8.5 mostra as variações mensais de volumes afluentes e de demandas atendidas pelo reservatório Carpina, onde se verifica que os maiores picos de afluência mensal ocorrem nos meses de maio, junho e julho, justificando a adoção da restrição de volume de espera.

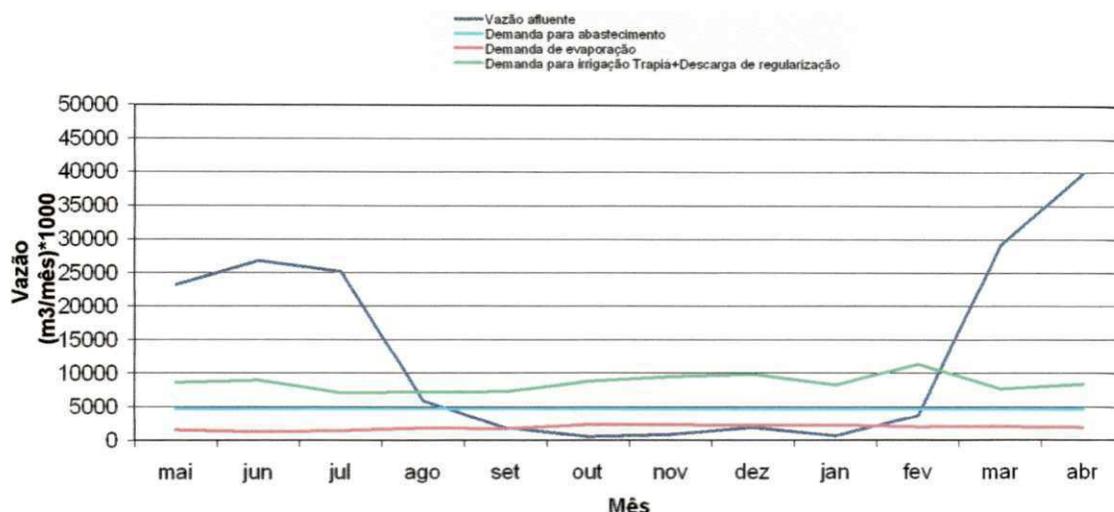


Figura 8.4 – Variação de volume afluente e demandas atendidas por Jucazinho no Cml

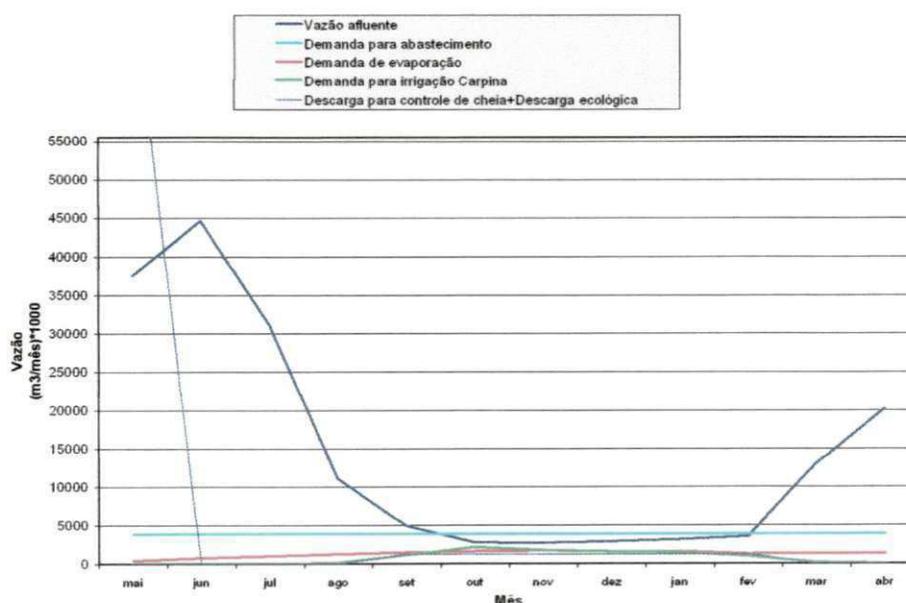


Figura 8.5 – Variação de volume afluente e demandas atendidas por Carpina no Cml

A demanda fixa mensal de $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$ destinada ao reforço do abastecimento de água da cidade de Recife, passível de ser aduzida do reservatório Carpina até a ETA do Sistema Tapacurá, é atendida sem falha. A demanda de evaporação média mensal no reservatório foi calculada em $1,297 \text{ hm}^3/\text{mês}$, o que equivale a uma vazão de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$, ou a uma lâmina de evaporação média mensal da ordem de $128,0\text{mm}$.

Pela Figura 8.5, observa-se que as maiores solicitações para sustentação da agricultura irrigada acontecem de setembro a fevereiro, e que, para esse mesmo período, a linha da demanda mensal correspondente ao abastecimento de Recife está situada bem acima da linha das afluições recebidas pelo reservatório. Compatível com definições adotadas para o controle

de cheias pode-se observar que os maiores picos de afluência mensal ocorrem entre os meses de março a julho. Diante disso, o modelo impõe descargas significativas no reservatório Carpina, entre os meses de maio e junho, visando atender a restrição para os volumes de espera em junho e julho, obedecidos aos demais critérios operacionais estabelecidos.

8.1.1.1.4 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO PROCESSO ITERATIVO

Neste cenário Cm1, respeitado o nível de tolerância especificado (da ordem de 10^{-5}), não foi violada qualquer das restrições mensais impostas ao sistema, conforme estabelecidas na seção 5.2.1 do Capítulo 5. É importante comentar que foi atendida a sustentação da vazão ecológica de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$, a jusante das represas, definida de ser suprida, obrigatoriamente, entre os meses de setembro a fevereiro. Sangrias não aconteceram nas represas. Quanto às restrições impostas para o controle de cheia, os valores das vazões mensais descarregadas para jusante de cada reservatório ficaram bem abaixo das capacidades máximas da calha do rio Capibaribe, definidas no estudo em $1.000,00 \text{ m}^3/\text{s}$ e $300,00 \text{ m}^3/\text{s}$, a jusante dos reservatórios de Jucazinho e Carpina, respectivamente.

8.1.1.2 - RESULTADOS DO Cm2

8.1.1.2.1 - AGRICULTURA IRRIGADA

No Cm2, a única alteração operada no sistema, em relação ao Cm1, é a mudança da vazão para reforço do abastecimento de Recife que passa para $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$. A Tabela 8.6 apresenta as áreas de plantio e receita líquida RL anual otimizadas, por cultura e perímetro. Apresenta-se na Tabela 8.7 a relação entre a área de plantio otimizada e a área irrigável total disponível em cada perímetro, dando o percentual de ocupação dos terrenos.

Uma dedução que se faz sobre a resposta agrícola deste Cm2, é que o modelo ampliou as áreas irrigadas ótimas para os três perímetros, sendo significativo para o incremento da RL anual. Isso se deve à redução da vazão de reforço para Recife, o que gera maior disponibilidade hídrica no reservatório Jucazinho, que atua como “barragem - mãe” na regulação de liberações de água para atendimento das demandas de todo o sub-sistema. A Tabela 8.8 apresenta as vazões mensais ótimas para os perímetros Trapiá, Carpina e Várzeas-Passira no cenário Cm2.

Tabela 8.6 – Área e receita líquida ótimas anuais, por cultura e perímetro, no Cm2

Cultura	Perímetro					
	Trapiá		Carpina		Várzeas e Passira	
	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)
Banana	88,18	1.032,87	299,85	3.517,28	78,28	917,49
Tomate _(s)	299,68	6.207,30	99,86	2.074,72	249,89	5.185,59
Melancia _(es)	Nc	-	149,77	642,79	399,54	1.707,80
Melão _(es)	Nc	-	149,82	445,03	10,32	30,37
Feijão _(s)	5,41	(-1,04)	5,73	(-0,83)	15,26	(-2,45)
Feijão _(es)	10,32	1,78	7,60	1,54	2,03	0,38
Milho _(s)	10,10	15,13	199,99	306,70	499,53	760,77
Graviola	117,47	952,31	399,61	3.243,94	18,43	149,48
Goiaba	25,14	126,46	299,99	1.512,82	21,61	108,85
Coco anão	nc	-	399,69	8.341,65	1.499,99	31.289,39
Algodão _(es)	10,20	(-44,93))	nc	-	10,18	(-44,73)
Área/Perímetro	545,98	-	1.704,82	-	2.382,99	-
RL/Perímetro	-	8.289,88	-	20.085,64	-	40.102,93
RL total (R\$)	68.478.450,00					

nc – cultura não plantada no perímetro

Tabela 8.7 – Grau de utilização das áreas disponíveis de cada perímetro no Cm2

Perímetro	Área disponível (ha)	Área de plantio otimizada (ha)	Ocupação da área disponível (%)
Trapiá	4.500	545,98	12,13
Carpina	1.800	1.704,82	94,71
Várzeas, Passira	6.750	2.382,99	35,31
Total	13.050	4.633,79	35,51

Tabela 8.8 - Vazões mensais ótimas para os perímetros no Cm2 (m³/s)

Perímetro Trapiá (vazão média mensal = 0,126 m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,148	0,000	0,011	0,073	0,087	0,133	0,122	0,076	0,098	0,190	0,293	0,280
Perímetro Carpina (vazão média mensal = 0,316 m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,000	0,000	0,000	0,052	0,457	0,869	0,705	0,638	0,594	0,393	0,073	0,011
Perímetro Várzeas-Passira (vazão média mensal = 0,636 m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,134	0,000	0,000	0,470	0,834	1,343	1,088	1,020	0,995	0,829	0,443	0,474

8.1.1.2.2 - PISCICULTURA

São apresentados na Tabela 8.9, os resultados otimizados da piscicultura extensiva nos dois reservatórios, que teve uma RI anual menor em 27,5% do que a alcançada no Cm1, Isso pode ser explicado pelo fato de que o uso da água disponível nos reservatórios é priorizado pelo modelo para a atividade mais rentável, no caso a agricultura irrigada.

Tabela 8.9 – Resultados otimizados para a piscicultura no Cm2

Reservatório	Despesa por ano	Área mínima mensal de espelho d'água no ano (ha)	Produção anual (t)	Pescadores empregados	Receita líquida anual- RI (R\$)
Jucazinho	1	744,60	89,35	60	104.989,26
Carpina	1	462,90	55,34	37	65.264,19
Totais			144,69	97	170.253,45

8.1.1.2.3 - COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

A Tabela 8.10 mostra, no que tange ao reservatório Jucazinho: i) valor de volume afluente Q_a e da demanda, a nível anual, esclarecendo-se que foi somada a vazão de irrigação Trapiá com a vazão de regularização derivada para jusante, comprometida mais diretamente com a irrigação do perímetro Várzeas e Passira; ii) as demandas de irrigação e de regularização (última coluna da tabela) respondem por 53,5% do que foi requerido anualmente do reservatório. Na mesma tabela, para o caso do reservatório Carpina, tem-se: i) valores para o volume afluente (Q_a) e para a demanda atendida pelo reservatório Carpina, a nível anual; ii) são apropriadas, conjuntamente (última coluna), a descarga ecológica e a descarga que o reservatório tem que operar para preservar o volume de espera, definido para os meses de junho e julho, a qual obrigatoriamente é derivada para o rio, a jusante, dentro da solução que o modelo encontra para obedecer a restrição estabelecida.

Tabela 8.10 - Volumes afluentes e demandas anuais dos reservatórios no cenário Cm2

Reservatório Jucazinho										
Total	$Q_{a\text{anual}}$ (m^3) x 1000	Demanda anual (m^3) x 1000	Distribuição das demandas anuais							
			Abastecimento		Evaporação		Irrig+Regularz.			
			(m^3) x 1000	(%)	(m^3) x 1000	(%)	(m^3) x 1000	(%)		
	161.748	154.754	55.992	36,1	15.948	10,3	82.814	53,5		
Reservatório Carpina										
Total	$Q_{a\text{anual}}$ (m^3) x 1000	Demanda anual (m^3) x 1000	Distribuição das demandas anuais							
			Abastecimento		Evaporação		Irrigação		Cheia+Ecológica	
			(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x1000	(%)
	178.936	172.609	31.536	18,2	15.528	9,0	9.966	5,8	115.579	66,8

8.1.1.2.4 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO PROCESSO ITERATIVO

Neste cenário Cm2, respeitado o nível de tolerância especificado, não foi violada qualquer das restrições mensais impostas ao sistema, conforme estabelecidas na seção 5.2.1 do

Capítulo 5. É importante comentar que foi atendida a sustentação da vazão ecológica de 0,50 m³/s, a jusante das represas, definida de ser suprida, obrigatoriamente, entre os meses de setembro a fevereiro. Não aconteceram sangrias nos reservatórios e as vazões descarregadas para jusante de cada reservatório ficaram abaixo das capacidades máximas da calha do rio Capibaribe, definidas no estudo em 1.000,00 m³/s e 300,00 m³/s, para Jucazinho e Carpina, respectivamente.

8.1.1.3 - RESULTADOS DO Cm3

Para o Cm3, os dados adotados são os mesmos do Cm1, excetuando-se que, para o reservatório Jucazinho, o volume inicial (V_{ro}) passa para 50% do V_{rmax}, equivalente a 163.517.906 m³. O desempenho operacional do sistema, um pouco superior ao alcançado no Cm1, é apresentado de forma mais simplificada na discussão dos resultados.

8.1.1.3.1 - AGRICULTURA IRRIGADA

A Tabela 8.11 apresenta resultados para a receita líquida RL anual obtida em cada perímetro, e a receita líquida potencial anual total alcançada, superior em 13,61% quando comparada à RL do Cm1. Nesta mesma tabela, apresenta-se a relação entre a área de plantio otimizada (somatório das áreas irrigadas com culturas permanentes e sazonais) e a área irrigável total disponível em cada perímetro, indicando o percentual de ocupação dos terrenos.

Tabela 8.11 - Receita líquida anual e utilização das áreas de cada perímetro no Cm3

Receita líquida anual otimizada			
Discriminação	Perímetro		
	Trapiá	Carpina	Várzeas e Passira
RL /Perímetro (R\$)	7.742.510,00	19.982.760,00	39.624.780
RL total (R\$)	67.350.050,00		
Grau de utilização das áreas disponíveis de cada perímetro			
Perímetro	Área disponível (ha)	Área de plantio otimizada (ha)	Ocupação da área disponível (%)
Trapiá	4.500	490,10	8,64
Carpina	1.800	1.695,41	29,91
Várzeas e Passira	6.750	3.481,32	61,43
Total	13.050	5.666,83	43,42

A Tabela 8.12 apresenta as vazões médias mensais ótimas para os perímetros no cenário Cm3.

Tabela 8.12 - Vazões mensais ótimas para os perímetros no Cm3 (m³/s)

Perímetro Trapiá (vazão média mensal = 0,112 m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,142	0,000	0,009	0,058	0,070	0,106	0,093	0,058	0,074	0,170	0,277	0,276
Perímetro Carpina (vazão média mensal = 0,314 m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,000	0,000	0,000	0,052	0,452	0,860	0,703	0,636	0,592	0,391	0,073	0,011
Perímetro Várzas-Passira (vazão média mensal = 0,625 m ³ /s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,133	0,000	0,000	0,463	0,825	1,326	1,066	0,997	0,974	0,812	0,436	0,471

8.1.1.3.2 - PISCICULTURA

Os resultados otimizados com a prática da piscicultura extensiva nos dois reservatórios estão mostrados na Tabela 8.13. A receita líquida anual RI é menor 16,8% do que a alcançada no Cm1, em razão da redução de áreas de espelho d'água nas represas.

Tabela 8.13 - Resultados otimizados para a piscicultura no Cm3

Reservatório	Despesa por ano	Área mínima mensal de espelho d'água no ano (ha)	Produção anual (t)	Pescadores empregados	Receita líquida anual - RI (R\$)
Jucazinho	1	916,4	109,97	73	129.212,16
Carpina	1	474,5	56,95	38	66.911,43
Totais			166,92	111	196.123,59

8.1.1.3.3 - COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS**Reservatório Jucazinho**

Todas os requisitos mensais relacionadas ao controle de cheia e sustentabilidade hídrica em Jucazinho, de vazões mensais para o abastecimento (1,80 m³/s) e uso ecológico (0,50 m³/s) foram atendidos, não se registrando sangrias ao longo do período simulado. A Tabela 8.14 mostra valores de volumes afluentes (Qa) e demandas requeridas, a nível anual, para o reservatório.

Tabela 8.14 - Volume afluente e demandas anuais atendidas em Jucazinho no Cm3

	Qa _{anual} (m ³) x 1000	Demanda anual (m ³) x 1000	Distribuição das demandas anuais					
			Abastecimento		Evaporação		Irrig+Regularz.	
			(m ³) x 1000	(%)	(m ³) x 1000	(%)	(m ³) x 1000	(%)
Total	161.748	156.873	55.992	35,7	18.540	11,9	82.341	52,5

Reservatório Carpina

A Tabela 8.15, a seguir, mostra valores de volumes afluentes (Q_a) e demandas requeridas, a nível anual, para o reservatório Carpina. Todas os requisitos mensais relacionadas ao controle de cheia e sustentabilidade hídrica em Carpina, de vazões mensais para o reforço do abastecimento de Recife ($1,50 \text{ m}^3/\text{s}$) e uso ecológico ($0,50 \text{ m}^3/\text{s}$) foram atendidos, não se registrando sangrias ao longo do período simulado.

A descarga ecológica e a descarga que o reservatório tem que operar para preservar o volume de espera, dentro da solução que o modelo encontra para obedecer à restrição estabelecida, representaram 58,4% de toda a demanda anual requerida ao reservatório. A alteração do volume inicial (V_{ro}) em Jucazinho, de 69% do V_{max} para 50% do V_{max} , combinada com o V_{ro} igual 37% de V_{max} no Carpina não acarreta nenhuma alteração significativa no desempenho operacional das represas.

Tabela 8.15 - Volume afluente e demandas anuais atendidas em Carpina no Cm3

	$Q_{a_{\text{anual}}}$ (m^3) x 1000	Demanda anual (m^3) x 1000	Distribuição das demandas anuais							
			Abastecimento		Evaporação		Irrigação		Cheia+ Ecológica	
			(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x 1000	(%)
Total	178.399	174.774	47.304	27,1	15.444	8,8	9.902	5,7	102.124	58,4

8.1.1.3.4 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO PROCESSO ITERATIVO

Neste cenário Cm3 não houve violação às restrições mensais impostas ao modelo.

8.1.1.4 - RESULTADOS DO Cm4

Neste cenário, estuda-se o comportamento do sub-sistema para a condição de se ter acumulações iniciais (V_{ro}) de $163.517.906 \text{ m}^3$ (50% de V_{rmax}) e de $81.000.000 \text{ m}^3$ (30% de V_{rmax}), em Jucazinho e Carpina, respectivamente. Os demais dados de entrada para o modelo são os mesmos descritos para o Cm3, excetuando-se a vazão de reforço do abastecimento de Recife que passa a ser de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.1.1.4.1 - AGRICULTURA IRRIGADA

A Tabela 8.16 apresenta resultados otimizados para áreas de plantio e receita líquida RL anual auferida por cultura e perímetro, e a sua totalização. Considerada a resposta agrícola

obtida no Cm4, verifica-se que o coco anão é a cultura de maior rentabilidade. A relação entre a área de plantio otimizada (somatório das áreas irrigadas com culturas permanentes e sazonais, seja na safra ou na entressafra) e a área irrigável total disponível em cada perímetro, está apresentada na Tabela 8.17, constando também o percentual de utilização das áreas de cada perímetro, o que representa o grau de ocupação dos terrenos pela agricultura irrigada, dentro das condições estipuladas no estudo.

Tabela 8.16 - Área e receita líquida anual ótimas, por cultura e perímetro, no Cm4

Cultura	Perímetros						RL total por cultura (RS*1000)
	Trapiá		Carpina		Várzeas-Passira		
	Área (ha)	RL (RS*1000)	Área (ha)	RL (RS*1000)	Área (ha)	RL (RS*1000)	
Banana	513,66	6.016,68	299,99	3.518,92	107,39	1.258,66	10.794,26
Tomate _(s)	299,85	6.210,89	99,74	2.072,21	249,71	5.181,72	13.464,82
Melancia _(es)	nc	-	149,66	642,28	399,92	1.709,43	2.351,71
Melão _(es)	nc	-	149,86	445,16	13,23	38,94	484,10
Feijão _(s)	5,40	(-1,05)	14,86	(-2,15)	16,32	(-2,62)	(-5,81)
Feijão _(es)	12,26	2,12	5,08	1,03	2,06	0,38	3,53
Milho _(s)	11,50	17,22	199,89	306,54	498,42	759,08	1.082,84
Graviola	219,99	1.783,44	399,58	3.243,66	20,78	168,54	5.195,64
Goiaba	23,64	118,94	299,58	1.510,74	20,03	100,88	1.730,56
Coco anão	nc	-	399,52	8.338,11	1.479,79	31.243,49	39.581,60
Algodão _(es)	10,16	(-44,73)	nc	-	10,60	(-46,56)	(-91,29)
Área/Perímetro	1.096,46	-	1.780,16	-	2.816,98	-	-
RL / Perímetro	-	14.103,52	-	20.076,50	-	40.411,95	-
RL total (RS)	74.591.970,00						

nc – cultura não plantada no perímetro

Tabela 8.17 - Grau de utilização das áreas disponíveis de cada perímetro no Cm4

Perímetro	Área disponível (ha)	Área de plantio otimizada (ha)	Ocupação da área disponível (%)
Trapiá	4.500	1.096,46	19,26
Carpina	1.800	1.780,16	31,27
Várzeas e Passira	6.750	2.816,98	49,47
Total	13.050	5.693,60	43,64

A melhor resposta agrícola neste cenário Cm4, onde se observa que para o perímetro Carpina quase toda a área disponível é alocada com plantios, pode ser atribuída ao fato de que o reservatório Carpina, além de ser solicitado em apenas 1,0 m³/s para atender o reforço do abastecimento de Recife, se beneficia da condição de ser ter maior disponibilidade relativa de água em todo o sub-sistema hídrico, explicada pelos valores iniciais adotados para os reservatórios o que gera, conseqüentemente, uma minoração do requerimento operacional da sustentabilidade.

As Figuras 8.6 e 8.7 permitem, respectivamente, uma visualização das áreas totais plantadas por cultura, no âmbito dos três perímetros, e a participação percentual de cada cultura na formação da receita líquida RL total auferida no processo de otimização. O destaque fica para a cultura coco anão, tanto em área total plantada, quanto na composição da RL total auferida com a agricultura irrigada.

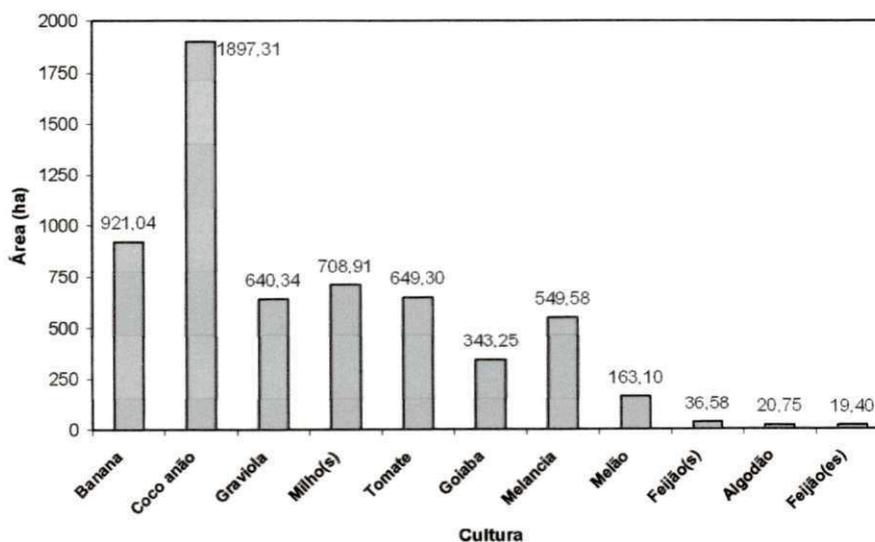


Figura 8.6 - Áreas otimizadas totais por cultura para o Cm4

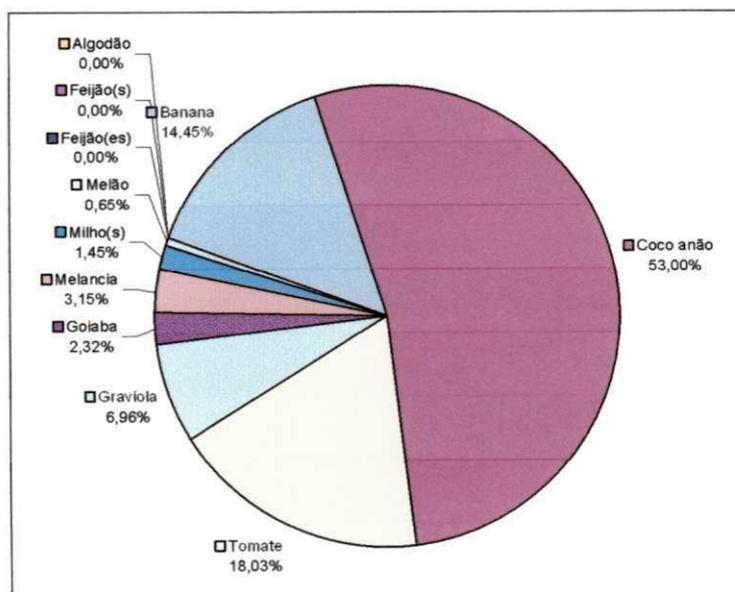


Figura 8.7 - Participação de cada cultura na formação da RL anual otimizada no Cm4 considerando todos os perímetros irrigados.

A Tabela 8.18 apresenta as vazões médias ótimas calculadas para os perímetros Trapiá, Carpina e Várzeas/Passira no cenário Cm4.

Tabela 8.18 - Vazões mensais ótimas para os perímetros no Cm4 (m³/s)

Perímetro Trapiá (vazão média mensal = 0,302 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,245	0,000	0,055	0,252	0,284	0,428	0,420	0,285	0,360	0,410	0,494	0,386
Perímetro Carpina (vazão média mensal = 0,316 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,000	0,000	0,000	0,052	0,456	0,867	0,705	0,638	0,594	0,392	0,073	0,012
Perímetro Várzeas-Passira (vazão média mensal = 0,644 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,133	0,000	0,000	0,477	0,846	1,363	1,105	1,035	1,010	0,840	0,448	0,477

8.1.1.4.2 - PISCICULTURA

A Tabela 8.19 apresenta resultados otimizados para a piscicultura extensiva nos dois reservatórios, que teve uma RI anual menor em 39,9% do que a alcançada no Cm1, o que se explica pela redução de superfície livre dos lagos e pelo fato de que o uso da água disponível nos reservatórios é priorizado pelo modelo para a agricultura irrigada, atividade que emprega mais mão de obra e de maior retorno econômico.

Tabela 8.19 – Resultados otimizados para a piscicultura no Cm4

Reservatório	Despesa por ano	Área mínima mensal de espelho d'água no ano (ha)	Produção anual (t)	Pescadores empregados	Receita líquida anual - RI (R\$)
Jucazinho	1	919,3	110,31	74	129.618,21
Carpina	1	81,0	9,72	6	11.422,77
Totais			120,03	80	141.040,98

8.1.1.4.3 - COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

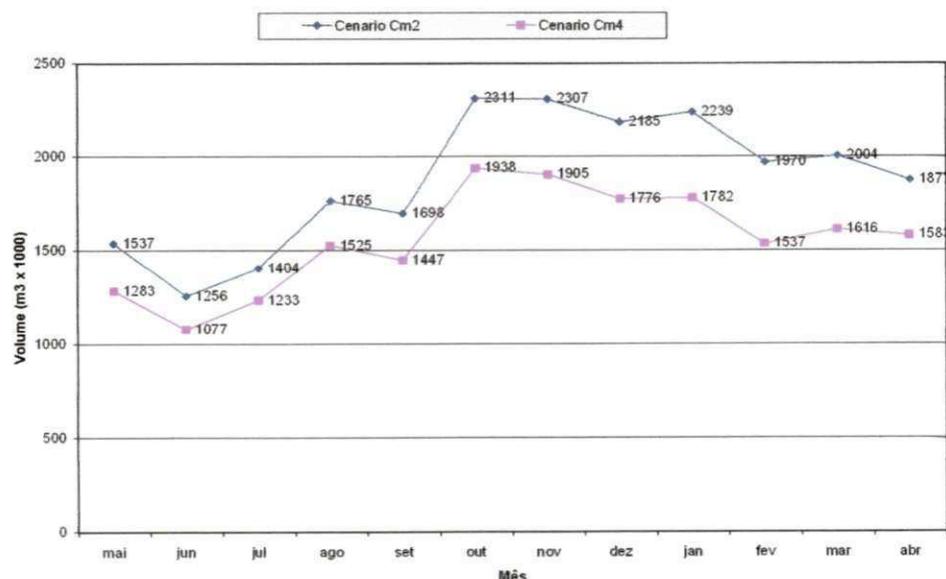
Reservatório Jucazinho

Para Jucazinho foram atendidas todos os requisitos mensais relacionadas ao controle de cheia, sustentabilidade hídrica, do abastecimento humano (1,8m³/s) e de vazões regularizadas, não havendo sangrias ao longo do período simulado. O volume anual precipitado sobre Jucazinho foi estimado em cerca de 9.232.411 m³. A Tabela 8.20 apresenta valores para as demandas atendidas e para o volume afluente (Qa), a nível anual, esclarecendo-se que na última coluna (Irrig+Regularz) é feita a juntada das vazões de irrigação para Trapiá com as vazões de regularização liberadas para jusante, que são comprometidas com a irrigação do perímetro Várzeas e Passira.

Tabela 8.20 - Demandas e volume afluyente anuais do reservatório Jucazinho no Cm4

	Q _a anual (m ³) x1000	Demanda anual (m ³) x 1000	Distribuição das demandas anuais atendidas					
			Abastecimento		Evaporação		Irrig+Regularz.	
			(m ³) x 1000	(%)	(m ³) x1000	(%)	(m ³) x1000	(%)
Total	161.748	169.080	55.992	33.1	18.696	11.1	94.392	55,8

Quando comparados resultados do Cm4 e do Cm2, onde a demanda para reforço do abastecimento de Recife tem o mesmo valor (1,0 m³/s), são reveladas algumas diferenças no que tange às demandas para irrigação: enquanto no Cm2 a demanda com irrigação de Trapiá, somada àquela de regularização, responde por 53,5% da demanda total anual, no Cm4 esse valor passa para 55,8% da demanda total, o que justifica uma maior área irrigada no Cm4. A variação dos volumes médios mensais de evaporação em Jucazinho, comparados o Cm4 e o Cm2, está apresentada na Figura 8.8, pela qual se observa que nos meses de agosto a janeiro, período de ocorrência do chamado “verão” na região, são registradas os maiores volumes evaporados na represa.

**Figura 8.8** - Volume médio mensal evaporado no reservatório Jucazinho (Cm4 x Cm2)

Reservatório Carpina

Para o reservatório Carpina foram atendidas as restrições mensais relacionadas ao controle de cheia, sustentabilidade hídrica, de vazões regularizadas, inclusive a vazão de reforço de 1,0 m³/s para o abastecimento de Recife. Não houve sangrias ao longo do período simulado. A Tabela 8.21, a seguir, apresenta valores para as demandas atendidas pelo

reservatório e o volume afluente Q_a a nível anual. Estão ali apropriadas como demanda, conjuntamente, na coluna “Cheia+Ecológica”, a descarga que o reservatório operou para que fosse mantido o volume de espera, definido para os meses de junho e julho, e a descarga ecológica que tem ser derivada para o rio, a jusante, durante os meses de setembro a fevereiro. O volume anual precipitado no reservatório Carpina, neste Cm4, foi calculado em 8.904.938 m^3 .

Tabela 8.21 - Volume afluente e demandas do reservatório Carpina no Cm4

	$Q_{a\text{anual}}$ (m^3) x 1000	Demanda anual (m^3) x 1000	Distribuição das demandas anuais							
			Abastecimento		Evaporação		Irrigação		Cheia+Ecológica	
			(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x 1000	(%)	(m^3)x 1000	(%)
Total	171.682	151.677	31.536	20,8	12.072	7,9	9.966	6,6	98.103	64,5

Apresenta-se na Figura 8.9 a variação dos volumes evaporados médios mensais nos cenários Cm4 e Cm2 para o reservatório Carpina, com os máximos ocorrendo entre os meses de agosto a janeiro.

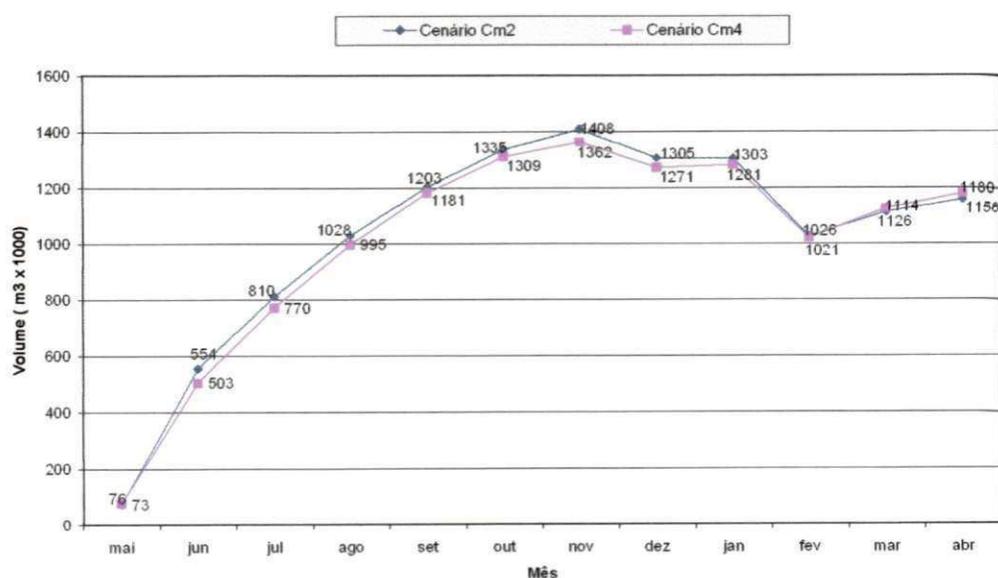


Figura 8.9 - Volume mensal evaporado no reservatório Carpina (Cm4 x Cm2)

8.1.1.4.4 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO PROCESSO ITERATIVO

Neste cenário Cm4, respeitado o nível de tolerância especificado (da ordem de 10^{-5}), não foi violada qualquer das restrições mensais impostas ao sistema, conforme estabelecidas na seção 5.2.1 do Capítulo 5. Foi atendida a sustentação da vazão ecológica de 0,50 m^3/s , a jusante das represas, entre os meses de setembro a fevereiro, como especificado na

modelagem, não havendo vertimentos pelas represas. Quanto às restrições impostas para o controle de cheia, os valores das vazões mensais descarregadas para jusante de cada reservatório ficaram bem abaixo das capacidades máximas da calha do rio Capibaribe, definidas no estudo em 1.000,00 m³/s e 300,00 m³/s, a jusante dos reservatórios de Jucazinho e Carpina, respectivamente.

8.1.1.5 - SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA A SITUAÇÃO CLIMÁTICA MÉDIA NO SUB-SISTEMA JUCAZINHO-CARPINA

Uma síntese comparativa dos resultados da otimização para os cenários vinculados à situação climática média, com base nas receitas líquidas ótimas RL da produção agrícola irrigada, está apresentada na Tabela 8.22.

Tabela 8.22 - Síntese dos resultados da resposta agrícola do sub-sistema Jucazinho-Carpina

Situação climática média					
Volumes iniciais nos reservatórios (Vro)		Cenário			
		Cm1	Cm2	Cm3	Cm4
Vro em Jucazinho		0,69V _{rmax}	0,69V _{rmax}	0,50V _{rmax}	0,50V _{rmax}
Vro em Carpina		0,37V _{rmax}	0,37V _{rmax}	0,37V _{rmax}	0,30V _{rmax}
Desempenho agrícola					
1-Receita líquida anual (RL)	R\$	59.279.750	68.478.450	67.350.050	74.591.970
1.1-Incremento de RL (*)	%	-	15,51	13,61	25,83
2-Área total de plantio otimizada	ha	4.084,28	4.633,79	5.666,83	5.693,60
3-Área total disponível para plantio	ha	13.050 (Somatório das áreas dos perímetros Trapiá, Carpina, Várzeas-Passira)			
4-Ocupação da área disponível	%	31,30	35,51	43,42	43,64

(*) Os valores para 1.1 são calculados em função do valor de RL obtida no Cm1.

Observada a Tabela 8.22, é importante apontar: (i) entre os cenários Cm1 e Cm3, equalizados quanto ao aspecto da alocação de demandas para o abastecimento urbano (adutora de Jucazinho com vazão de projeto de 1,80 m³/s e vazão de reforço para abastecimento de Recife de 1,5 m³/s), o Cm3 apresenta maior receita líquida RL, com um grau de 43,4% de ocupação da área total disponível para exploração da agricultura irrigada; (ii) o melhor desempenho da agricultura irrigada, tanto em receita líquida quanto em área cultivada, registra-se no cenário no Cm4, o que pode ser atribuído à maior disponibilidade relativa de água para

irrigação, em todo o sistema hídrico, uma vez que o valor inicial V_{ro} adotado para o reservatório Jucazinho, associado ao menor V_{ro} para Carpina, gera, conseqüentemente, minoração do requerimento operacional para a sustentabilidade hídrica dos dois reservatórios, permitindo alocar maiores áreas de fruteiras no perímetro Várzeas-Passira, cujo potencial agrícola é bem maior do que em Trapiá, quer em área disponível, quer na melhor qualidade do solo. Associado esses fatores, destaca-se que a demanda para reforço do abastecimento de Recife no cenário Cm4 é de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Tabela 8.23 sintetiza as vazões médias mensais ótimas para os perímetros Trapiá, Carpina e Várzeas/Passira calculadas para os cenários Cm1, Cm2, Cm3 e Cm4.

Tabela 8.23 - Vazões médias mensais ótimas para os perímetros nos cenários Cm1 a Cm4

Perímetro de irrigação	Cm1	Cm2	Cm3	Cm4
	Vazão média mensal (m^3/s)			
Trapiá	0,026	0,126	0,112	0,302
Carpina	0,309	0,316	0,314	0,317
Várzeas/Passira	0,612	0,636	0,625	0,644

Os resultados do Cenário Cm4, no que tange à ocupação da mão-de-obra requerida nos perímetros, apontam a alocação de 887.511 diárias no ano, considerando o plantio das culturas nos três perímetros. Para um total de 5.693,60 ha de área ótima plantada, considerando um requerimento médio de 133,5 homem/dia/ha ao longo do ano, com base nos dados da Tabela 6.24 do Capítulo 6, poderia ser gerado cerca de 1,14 emprego direto por hectare. Este valor, compatível com o coeficiente técnico de mão-de-obra usado para colonos em perímetros de irrigação, estimado em 1,00 emprego/ha/ano (Maffei, et al.,1986), permite cogitar que o subsistema Jucazinho-Carpina, no contexto de normalidade climática, pode gerar cerca de 5.670 empregos diretos com o desenvolvimento da agricultura irrigada.

Para a piscicultura extensiva nos reservatórios Jucazinho e Carpina, a Tabela 8.24 permite comparar os resultados obtidos nos cenários testados, sendo possível deduzir que o cenário Cm1 ostenta as maiores áreas mensais mínimas de espelho d'água nos reservatórios, justificando a maior receita líquida anual Rl com piscicultura. No entanto, como a agricultura irrigada é uma atividade mais rentável, gerando mais emprego e renda, a prática da piscicultura extensiva nos reservatórios deve se espelhar nos resultados do cenário Cm4, prognosticando-se uma Rl anual da ordem de R\$141.040,98, com per capita de quase R\$1.763,00 / ano / pescador.

Tabela 8.24 – Resultados da piscicultura nos reservatórios para a situação climática média

Volumes iniciais nos reservatórios (Vro)		Cenários			
		Cm1	Cm2	Cm3	Cm4
<i>Vro em Jucazinho</i>		0,69Vrmax	0,69Vrmax	0,50Vrmax	0,50Vrmax
<i>Vro em Carpina</i>		0,37Vrmax	0,37Vrmax	0,37Vrmax	0,30Vrmax
<i>Desempenho da piscicultura</i>					
<i>1- Receita líquida anual (RI)</i>	RS	235.018,11	170.253,45	196.123,59	141.040,98
<i>1.1-Incremento de RI (*)</i>	%	-	-	-	-
<i>1.2-Decréscimo de RI (*)</i>	%	-	(-27,6)	(-16,5)	(-39,9)
<i>2- Área mensal mínima de espelho d'água</i>					
<i>2.1 - Jucazinho</i>	ha	1.198,20	744,60	916,40	919,30
<i>2.2 - Carpina</i>		468,60	462,90	474,50	81,00
<i>3- Produção anual</i>	t	200,01	144,69	166,92	120,03
<i>4- Mão de obra empregada</i>	p	133	97	111	80

(*) Os valores para 1.1 e 1.2 estão calculados com base no valor de RI do Cm1; (p) = pescador

8.1.1.6 - RESULTADOS PARA A SITUAÇÃO CLIMÁTICA SECA NO SUB-SISTEMA JUCAZINHO-CARPINA

No cenário Cs1, analisou-se o desempenho do sub-sistema no caso em que os reservatórios contassem para o início da operação, a partir de maio, com os maiores volumes ativos, pressupondo uma maior disponibilidade de água para o atendimento dos requerimentos hídricos estipulados. No cenário Cs2, observou-se o desempenho do sub-sistema para a condição de volumes de espera nulos, sendo permitido que, nos meses de grandes afluxos ao rio Capibaribe, os reservatórios acumulem volumes iguais às suas capacidades máximas.

Na situação climática seca, chama-se atenção para o valor fixo de 1,0 m³/s adotado para reforço do abastecimento de Recife. Quando incrementada essa vazão para 1,5 m³/s, o processo iterativo de otimização não convergiu, sendo violadas muitas das restrições estipuladas. Em ambos os cenários, as vazões de 1,8 m³/s para o sistema adutor de Jucazinho e de 1,0 m³/s para Recife foram atendidas, em todos os meses.

Uma síntese dos resultados da otimização para os cenários da situação climática seca, com base nas receitas líquidas ótimas RL da agricultura irrigada, está apresentada na Tabela 8.25.

Tabela 8.25 - Resultados da resposta do sub-sistema Jucazinho-Carpina na seca

Volumes iniciais nos reservatórios (Vro)		Cenário	
		Cs1	Cs2
Vro em Jucazinho		0,69V _{rmax}	0,50V _{rmax}
Vro em Carpina		0,37V _{rmax}	0,30V _{rmax}
Desempenho agrícola			
1 - Receita líquida anual (RL)	R\$	42.170.890	59.129.420
1.1 - Incremento de RL (*)	%	-	40,21
2 - Área total de plantio otimizada	ha	3.312,34	4.073,11
3 - Área total disponível nos três perímetros.	ha	13.050	
4 - Ocupação da área total disponível	%	25,38	31,21

(*) O valor para 1.1 é calculado em função do valor de RL obtida no Cs1.

Complementando os dados da Tabela 8.25, é importante comentar: i) no cenário Cs2, o de maior receita líquida anual RL, 31,21% da área total disponível nos perímetros é ocupada, embora que este resultado tem a influência direta da não preservação do volume de espera nos dois reservatórios, o que gerou maior disponibilidade de água para uso na irrigação; ii) no contexto da situação de escassez hídrica idealizada, chama-se a atenção para o fato de que nos dois cenários foi violado o critério da sustentabilidade hídrica, mesmo quando não preservados os volumes de espera, como no cenário Cs2.

Considerando-se as áreas para cada cultura, no conjunto dos três perímetros, verifica-se, para o caso do Cs2, que a otimização oferece em relação às áreas máximas previstas nos planos culturais os resultados apresentados na Tabela 8.26.

Tabela 8.26 - Áreas otimizadas x áreas planejadas para os perímetros no Cs2

Cultura	Área máxima (ha)		Atendimento * (%)	Cultura	Área máxima (ha)		Atendimento * (%)
	Otimizada	Planejada			Otimizada	Planejada	
Banana	350,23	3.400,00	10,30	Milho _(s)	711,72	1.100,00	64,70
Tomate _(s)	649,72	650,00	99,96	Graviola	446,08	2.300,00	19,39
Melancia _(es)	139,28	550,00	25,32	Goiaba	335,99	2.700,00	12,44
Melão _(es)	61,88	550,00	11,25	Coco anão	1.652,78	1.900,00	85,57
Feijão _(s)	26,59	1.000,00	2,64	Algodão _(es)	20,00	850,00	2,36
Feijão _(es)	29,73	800,00	3,71	-	-	-	-

* O atendimento percentual (%) é o resultado de (A_{max} otimiz. / A_{max} planej.) x 100

Aplicando-se o coeficiente técnico de mão-de-obra usado para colonos em perímetros de irrigação, estimado em 1,00 emprego/ha/ano, pode se cogitar que o subsistema Jucazinho-Carpina, no contexto de uma situação de seca, pode gerar cerca de 4.000 empregos diretos com o desenvolvimento da agricultura irrigada.

A Tabela 8.27 apresenta as vazões médias mensais ótimas para os perímetros Trapiá, Carpina e Várzeas/Passira, para os cenários climáticos de seca.

Tabela 8.27 - Vazões mensais ótimas para os perímetros nos cenários de seca.

Cenário Cs1											
Perímetro Trapiá (vazão média mensal = 0,031 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,022	0,009	0,009	0,032	0,037	0,054	0,044	0,036	0,038	0,038	0,016	0,035
Perímetro Carpina (vazão média mensal = 0,369 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,013	0,000	0,000	0,055	0,774	0,878	0,705	0,688	0,662	0,595	0,051	0,010
Perímetro Várzeas-Passira (vazão média mensal = 0,350 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,195	0,005	0,023	0,292	0,399	0,573	0,510	0,492	0,504	0,516	0,274	0,413
Cenário Cs2											
Perímetro Trapiá (vazão média mensal = 0,096 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,159	0,009	0,009	0,033	0,039	0,056	0,044	0,036	0,038	0,228	0,129	0,376
Perímetro Carpina (vazão média mensal = 0,315 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,013	0,000	0,000	0,055	0,485	0,535	0,695	0,686	0,660	0,594	0,051	0,010
Perímetro Várzeas-Passira (vazão média mensal = 0,560 m³/s)											
Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
0,250	0,009	0,041	0,473	0,622	0,913	0,888	0,861	0,883	0,821	0,428	0,535

8.1.1.6.1- PISCICULTURA

A Tabela 8.28 mostra resultados otimizados da prática da piscicultura extensiva, no que tange ao cenário Cs2. Em que pese a produção de 84,60 toneladas de pescado no reservatório de Jucazinho, desprezada a pouca produção de pescado no Carpina, a Rl alcançada é quase 30% menor do que aquela obtida no Cm4, por exemplo.

Tabela 8.28 – Resultados otimizados para a piscicultura no Cs2

Reservatório	Produção anual (t)	Pescadores empregados	Receita líquida anual - Rl (R\$)
Jucazinho	84,60	56	99.402,43
Carpina	0,49	1	573,06
Totais	85,09	57	99.975,49

8.1.1.6.2 - COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

Nos cenários Cs1 e Cs2, as variações mensais de volumes armazenados nos reservatórios Jucazinho e Carpina estão apresentadas na Figuras 8.10 e 8.11, respectivamente. A Figura 8.10 mostra que no reservatório Jucazinho, nos meses de maio e junho, é preservado o volume de espera de 100 hm³, com os volumes armazenados sendo menores que 227 hm³; ao fim do último mês da simulação, o volume atinge apenas 213 hm³, violando o critério da sustentabilidade hídrica; a fase de depleção do reservatório se instala a partir do mês de junho e vai até fevereiro. Para o reservatório Carpina, nos meses de junho e julho, foi atendido o

volume de espera de 170 hm^3 , não sendo atendido o critério da sustentabilidade hídrica; o período de depleção do reservatório acontece entre os meses de maio a fevereiro, registrando-se nesse último mês um volume de apenas $2,572 \text{ hm}^3$.

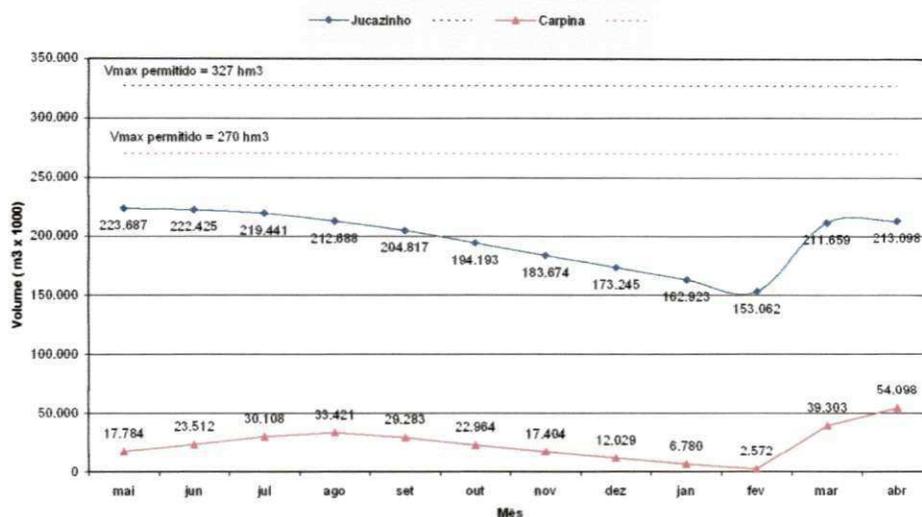


Figura 8.10 - Variação de volumes nos reservatórios Jucazinho e Carpina no Cs1

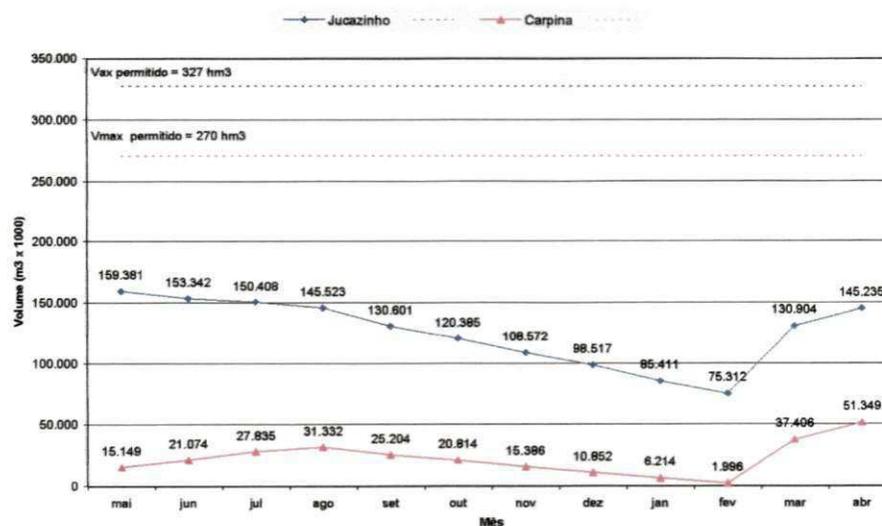


Figura 8.11 - Variação de volumes nos reservatórios Jucazinho e Carpina no Cs2

Pela Figura 8.11, pode-se apontar: i) não ocorrem sangrias nos reservatórios, ficando os níveis d'água mensais sempre abaixo das cotas dos respectivos sangradouros, ou seja cota 292m ($V_{\max} = 327,035 \text{ hm}^3$) para Jucazinho, e cota 118m ($V_{\max} = 270,0 \text{ hm}^3$) para Carpina; ii) no último mês da simulação os volumes atingem $145,23 \text{ hm}^3$ em Jucazinho e $51,34 \text{ hm}^3$ em Carpina, evidenciando violações à restrição da sustentabilidade hídrica definido para os reservatórios; iii) no reservatório Carpina, em fevereiro, o volume armazenado ($1,996 \text{ hm}^3$) chega próximo ao mínimo armazenamento estipulado ($V_{\min} = 1,509 \text{ hm}^3$, à cota 90m) para

boa operação da tomada d'água, denotando uma condição de quase colapso; iv) pela acentuada depleção verificada nos meses de junho a setembro em Jucazinho (o que não acontece com o reservatório Carpina), fica destacada a sua função de distribuir a água para atender as demandas solicitadas ao sub-sistema.

8.1.1.6.3 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO PROCESSO ITERATIVO

No cenário Cs1 não foram respeitadas as restrições: i) sustentabilidade hídrica dos reservatórios, correspondendo a duas restrições mensais violadas; ii) as vazões de regularização descarregadas no rio, através de Jucazinho estiveram abaixo da vazão mensal de $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ definida, ficando a média em $1,421 \text{ m}^3/\text{s}$, o que correspondendo a 12 restrições mensais violadas.

No Cs2 foram violadas as seguintes restrições: i) para os dois reservatórios não foi obedecido o critério da sustentabilidade hídrica, correspondendo a duas restrições mensais violadas; b) as vazões de regularização descarregadas no rio pelo reservatório de Jucazinho estiveram aquém da vazão mensal definida de $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$, ficando a média em $1,754 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo a 12 restrições mensais violadas.

Por tais violações, os resultados da otimização não são plenamente, confiáveis. As áreas irrigadas ótimas servem de indicadores para a análise que se fará pela aplicação do modelo de simulação ao sistema.

8.1.2 - RESULTADOS DO SUB-SISTEMA TAPACURÁ-GOITÁ-VÁRZEA DO UNA

A apresentação dos resultados mais representativos da otimização obtidos pela aplicação do modelo ORNAP para o sub-sistema Tapacurá - Goitá - Várzea do Una será feita para os cenários testados nas duas situações climáticas definidas, esclarecendo-se, onde necessário, com comentários para o melhor entendimento das análises realizadas.

8.1.2.1 - SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA A SITUAÇÃO CLIMÁTICA MÉDIA

8.1.2.1.1 - AGRICULTURA IRRIGADA

A Tabela 8.29 apresenta as áreas de plantio e receitas líquidas RL anuais otimizadas por culturas e perímetros, para cada cenário, evidenciando-se que o modelo aloca áreas, prioritariamente, para a irrigação de culturas de maior retorno financeiro.

Tabela 8.29 - Área e receita líquida otimizadas por cenário, cultura e perímetro, no ano médio

Cenário Cm5						
Cultura	Perímetro					
	Tapacurá		Goitá		Várzea do Una	
	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)
Banana	-	-	1.500,00	17.717,88	0,26	3,04
Tomate _(s)	399,81	8.303,92	-	-	299,98	6.232,64
Melancia _(es)	0,92	4,03	-	-	-	-
Feijão _(s)	-	-	0,74	(-0,02)	0,01	-
Feijão _(es)	-	-	-	-	-	-
Milho	0,07	0,12	0,01	0,01	-	-
Algodão _(es)	-	-	-	-	0,07	0,03
Cana de açúcar	-	-	-	-	-	-
Área/Perímetro	400,80	-	1.500,75	-	300,32	-
RL / Perímetro	-	8.308,08	-	17.717,87	-	6.235,72
RL total (R\$)	32.261.660,00					
Cenário Cm6						
Cultura	Perímetro					
	Tapacurá		Goitá		Várzea do Una	
	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)
Banana	-	-	1.499,00	17.706,07	-	-
Tomate _(s)	-	-	0,11	2,26	299,95	6.232,07
Melancia _(es)	0,01	0,03	0,07	0,29	-	-
Feijão _(s)	0,08	0,0	30,75	(-9,81)	-	-
Feijão _(es)	-	-	-	-	49,50	16,57
Milho	0,01	0,01	-	-	-	-
Algodão _(es)	-	-	-	-	-	-
Cana de açúcar	7,64	3,27	0,06	0,03	225,34	98,47
Área/Perímetro	7,74	-	1.529,99	-	574,79	-
RL / Perímetro	-	3,38	-	17.698,84	-	6.347,11
RL total (R\$)	24.949.330,00					
Cenário Cm7						
Cultura	Perímetros					
	Tapacurá		Goitá		Várzea do Una	
	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)
Banana	-	-	1.500,00	17.717,88	0,02	0,28
Tomate _(s)	-	-	0,12	2,40	299,93	6.231,95
Melancia _(es)	-	-	150,00	661,00	-	-
Feijão _(s)	-	-	0,32	(-0,01)	-	-
Feijão _(es)	-	-	-	-	161,57	54,09
Milho	0,11	0,18	-	-	-	-
Algodão _(es)	-	-	0,04	0,01	2,17	0,91
Cana de açúcar	209,65	89,80	0,04	0,02	349,29	152,45
Área/Perímetro	209,76	-	1.650,52	-	812,98	-
RL / Perímetro	-	89,98	-	18.381,30	-	6.439,46
RL total (R\$)	24.910.740,00					

Deduz-se da Tabela 8.29 que: i) o cenário Cm5 é o de maior RL potencial anual (R\$ 32.261.660,00), representando um incremento de 29,5% em relação à RL do Cm7; ii) o perímetro Goitá, dado à condição do reservatório Goitá não ser solicitado para o abastecimento humano, é o que ostenta as maiores áreas irrigadas ótimas, em todos os três cenários; iii) a banana, o tomate e a cana de açúcar, nesta seqüência, são as culturas de maiores áreas plantadas e de maiores receitas líquidas auferidas, considerados os três perímetros; iv) a área máxima planejada (1.500ha) para plantio da cultura banana no perímetro Goitá, é alocada em todos cenários; v) no cenário Cm5, as áreas máximas planejadas para o plantio da cultura tomate nos perímetros Tapacurá (400 ha) e Várzea do

Una (300 ha) foram praticamente atendidas; vi) nos cenários Cm6 e Cm7 as áreas máximas planejadas para o plantio da cultura tomate apenas são alocadas no perímetro Várzea do Una; vii) o plantio da cana de açúcar está contemplado apenas nos cenários Cm6 e Cm7, com maiores áreas ocupadas no perímetro Várzea do Una; vi) em todos os cenários, a cultura algodão é da pior desempenho em área plantada otimizada.

Aplicando-se o coeficiente técnico de mão-de-obra usado para colonos em perímetros de irrigação, estimado em 1,00 emprego/ha/ano, pode se cogitar que o subsistema Tapacurá - Goitá - Várzea do Una, no contexto de normalidade climática, pode gerar até 2.200 empregos diretos com o desenvolvimento da agricultura irrigada.

Na Tabela 8.30 estão apresentadas as áreas irrigadas ótimas para cada perímetro e os percentuais de ocupação da área disponível em cada um deles. Observa-se que no cenário Cm5, o que obteve a maior receita líquida, a área ocupada pela agricultura irrigada (2.201,87 ha) representa apenas 18,35% da área total (12.000 ha) planejada no estudo.

Tabela 8.30 - Áreas disponíveis x áreas otimizadas por cenário no ano médio

Cenário	Área total disponível (ha)	Área de plantio otimizada (ha)	Ocupação da área disponível (%)
Cm5	12.000	2.201,87	18,35
Cm6	12.000	2.112,52	17,61
Cm7	12.000	2.673,26	22,27

A Tabela 8.31 apresenta as vazões médias mensais ótimas para os perímetros Tapacurá, Goitá e Várzea do Una calculadas no processo de otimização.

Tabela 8.31 - Vazões médias mensais ótimas para os perímetros (Cenários Cm5, Cm6 e Cm7)

Perímetro de irrigação	Cm5	Cm6	Cm7
	Vazão média mensal (m ³ /s)		
Tapacurá	0,013	0,003	0,087
Goitá	0,553	0,567	0,571
Várzea do Una	0,005	0,088	0,143

8.1.2.1.2 – PISCICULTURA

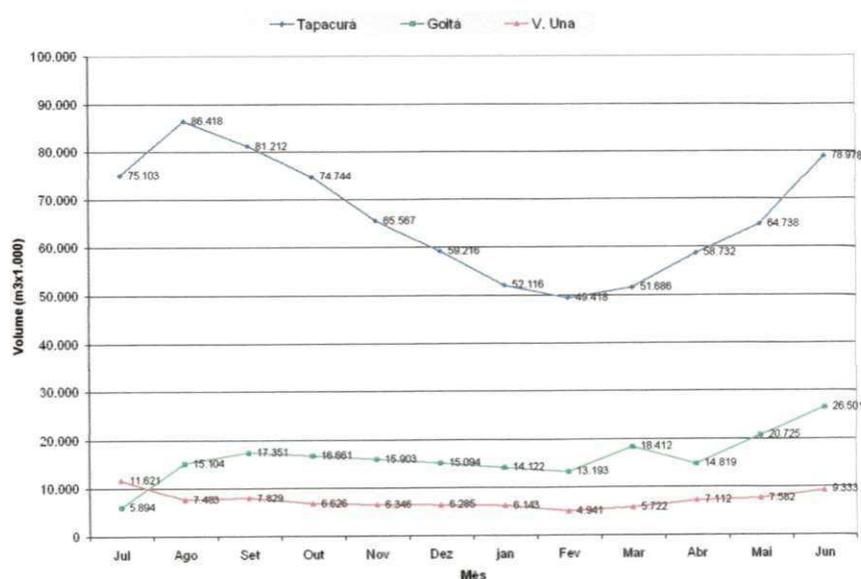
Na Tabela 8.32 estão apresentados os resultados otimizados da piscicultura extensiva para cada um dos reservatórios nos cenários da situação climática média. Por essa tabela, observa-se que o cenário Cm6 tem a maior RI anual com a atividade da piscicultura. No entanto, como a agricultura irrigada é uma atividade mais rentável, a prática da piscicultura nos reservatórios deve se basear nos resultados do cenário Cm5 (o de maior RL com irrigação), prognostica-se uma renda per capita em R\$1.759,37 / ano / pescador.

Tabela 8.32 - Resultados da piscicultura extensiva na situação climática média

Reservatório	Resultados	Cenário		
		Cm5	Cm6	Cm7
Tapacurá	Produção anual (t)	78.87	83.26	78.66
	Pescadores empregados	53	56	52
	Receita líquida anual (R\$)	92.675,37	97.832,39	92.430,74
Goitá	Produção anual (t)	11.12	11.17	10,91
	Pescadores empregados	7	7	7
	Receita líquida anual (R\$)	13.065,00	13.121,78	12.820,82
Várzea do Una	Produção anual (t)	8,83	6,48	2,50
	Pescadores empregados	6	4	2
	Receita líquida anual (R\$)	10.378,35	7.616,45	2.937,40
Resultados totais no sub-sistema de reservatórios				
Produção anual de pescado (t)		98,82	100,91	92,07
Receita líquida anual da piscicultura (R\$)		116.118,72	118.570,62	108.188,96
Total de pescadores empregados no ano		66	67	61
Renda per capita média / ano (R\$)		1.759,37	1.769,71	1.773,58

8.1.2.1.3 - COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

O comportamento das variações mensais de volumes armazenados nos reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una para os cenários da situação climática média, estão apresentados nas Figuras 8.12 a 8.14.

**Figura 8.12** - Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cm5

Pela Figura 8.12, observa-se: i) no reservatório Goitá, no mês de julho, foi atendida a condição de preservação do volume de espera de 26 hm^3 , havendo forte deplecionamento até o final do mês, solução que o modelo encontra em razão da afluência da ordem de $10,3 \text{ hm}^3$ e pelo fato de se ter iniciado o processo de otimização com um volume inicial V_{ro} de $26,5 \text{ hm}^3$; ii) para todos os reservatórios a fase de depleção das reservas hídricas se instala a partir do mês

de setembro, com picos de volumes mínimos em fevereiro; iii) para todos os reservatórios foi respeitada a condição de sustentabilidade hídrica; iv) nenhum dos reservatórios atinge o volume mínimo colocado como restrição do modelo; v) não ocorrem sangrias nos reservatórios.

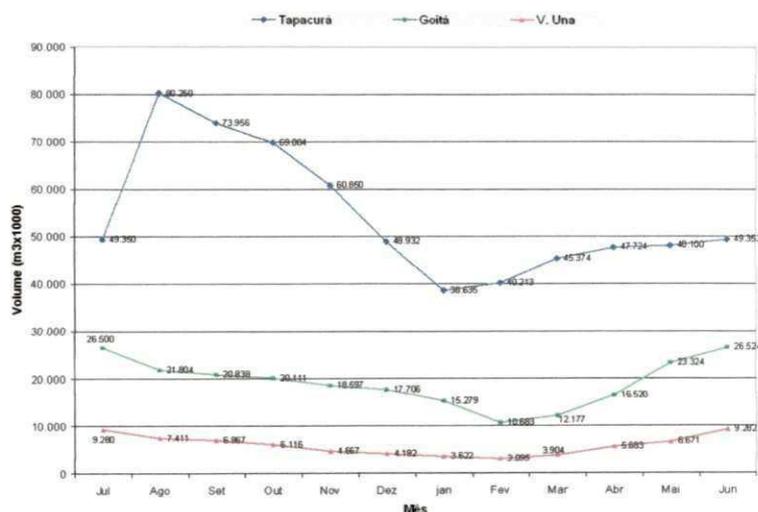


Figura 8.13 - Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cm6

Pela Figura 8.13, observa-se: i) no reservatório Goitá, no mês de julho, foi atendida a condição de preservação do volume de espera de 26 hm³; ii) para todos os reservatórios a fase de depleção das reservas hídricas se instala a partir do mês de setembro, com picos de volumes mínimos em fevereiro; iii) para todos os reservatórios foi respeitada a condição de sustentabilidade hídrica; iv) nenhum dos reservatórios atinge o volume mínimo colocado como restrição do modelo; v) não ocorrem sangrias nos reservatórios.

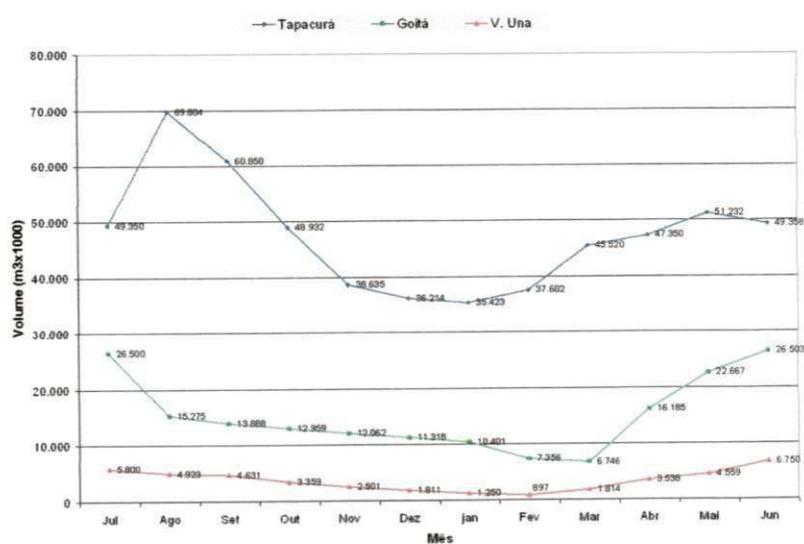


Figura 8.14 - Variação mensal de volumes dos reservatórios no Cm7

Pela Figura 8.14, observa-se: i) no reservatório Goitá, no mês de julho, foi atendida a condição de preservação do volume de espera de 26 hm³; ii) para todos os reservatórios a fase de depleção das reservas hídricas se instala a partir do mês de setembro, com menores acumulações entre dezembro e março, destacando que no reservatório Várzea do Una o volume acumulado no mês de março foi de apenas 897.000m³ (pouco acima do volume mínimo definido em 671.000m³), quase que entrando em colapso; iii) todos os reservatórios atendem a condição de sustentabilidade hídrica; iv) não ocorrem sangrias nos reservatórios.

Complementando as Figuras 8.12 a 8.14, as Tabelas 8.33 a 8.35 apresentam valores mensais de aflúncias (Qa), e valores médios mensais otimizados pelo modelo para as demandas do abastecimento humano (Qd) e da irrigação (Q_{irrig}), além da evaporação (Q_{evp}) de cada reservatório, considerando ainda o somatório das vazões médias ótimas captadas nas elevatórias de água bruta Tiúma e Castelo (Q_{tc}) para a ETA.

Tabela 8.33 - Vazões e demandas (em m³/s) de cada reservatório para o cenário Cm5

Mês	Reservatório Tapacurá				Captações Q _{tc}	Reservatório Goitá			Reservatório Várzea do Una			
	Qa	Qd	Q _{irrig}	Q _{evp}		Qa	Q _{irrig}	Q _{evp}	Qa	Qd	Q _{irrig}	Q _{evp}
Jul	13,11	2,57	0,000	0,37	0,53	10,33	0,000	0,04	1,76	0,57	0,000	0,06
Ago	4,53	2,52	0,000	0,45	1,52	4,39	0,432	0,12	0,95	0,56	0,000	0,05
Set	0,95	2,84	0,001	0,48	0,86	1,94	0,804	0,14	0,67	0,65	0,000	0,06
Out	0,54	2,60	0,001	0,53	0,55	1,04	1,155	0,16	0,47	0,49	0,000	0,05
Nov	0,65	2,06	0,000	0,51	1,49	0,94	1,092	0,16	0,48	0,50	0,000	0,06
Dez	0,78	2,81	0,000	0,49	0,65	0,99	1,170	0,17	0,53	0,50	0,000	0,05
Jan	0,60	2,94	0,000	0,46	0,51	0,78	1,047	0,15	0,54	0,50	0,000	0,07
Fev	0,95	1,63	0,122	0,37	1,47	0,96	0,764	0,12	0,53	0,55	0,063	0,04
Mar	2,87	1,97	0,001	0,38	1,30	2,53	0,174	0,15	1,04	0,53	0,000	0,05
Abr	5,45	2,00	0,032	0,34	0,51	4,74	0,000	0,04	1,21	0,52	0,000	0,04
Mai	4,59	2,52	0,001	0,35	0,81	4,57	0,000	0,12	1,02	0,63	0,000	0,05
Jun	7,65	2,06	0,001	0,38	1,50	8,40	0,000	0,21	1,53	0,51	0,000	0,05
Média	3,56	2,38	0,013	0,43	1,10	3,47	0,553	0,13	0,89	0,53	0,005	0,05

Pela Tabela 8.33, é possível concluir: i) a vazão Qd de 4,0m³/s destinada ao abastecimento de Recife é atendida, sendo composta, em termos de vazões médias mensais otimizadas, da seguinte forma: 2,38 m³/s a partir do reservatório Tapacurá, 1,10 m³/s pelas captações de Tiúma e Castelo e 0,53 m³/s a partir do reservatório Várzea do Una; ii) as vazões mensais para o abastecimento da ETA são variáveis que o modelo busca otimizar, prioritariamente, ao tempo que tenta alocar água para a irrigação; iii) para o perímetro Goitá, registra-se a maior demanda hídrica média mensal apropriada na irrigação, definida pela vazão de 0,553 m³/s; iii) nos meses de setembro a fevereiro (meses de baixas precipitações nos perímetros), ocorrem as maiores solicitações de água para complementar, através da irrigação, as demandas requeridas pelas culturas.

Tabela 8.34 - Vazões e demandas (em m³/s) de cada reservatório para o cenário Cm6

Mês	Reservatório Tapacurá				Captações	Reservatório Goitá			Reservatório Várzea do Una			
	Qa	Qd	Qirrg	Qevp	Qtc	Qa	Qirrg	Qevp	Qa	Qd	Qirrg	Qevp
Média	3,56	2,27	0,003	0,42	1,20	3,47	0,567	0,12	0,89	0,52	0,088	0,04

Pela Tabela 8.34, observa-se: i) a vazão Qd de 4,0m³/s destinada ao abastecimento de Recife é atendida, sendo composta, em termos de vazões médias mensais otimizadas, da seguinte forma: 2,27 m³/s a partir do reservatório Tapacurá, 1,20 m³/s pelas captações de Tiúma e Castelo e 0,52 m³/s a partir do reservatório Várzea do Una; ii) para o perímetro Goitá, a exemplo do cenário Cm5, registra-se a maior demanda hídrica média apropriada na irrigação, definida pela vazão média mensal de 0,567 m³/s; iii) as demandas de evaporação são menores, do que no Cm5, visto os volumes iniciais dos reservatórios Tapacurá e Goitá concorrem para menores áreas de espelho d'água durante o ano; iv) como no Cm5, nos meses de setembro a fevereiro (meses de baixas precipitações nos perímetros), acontecem maiores solicitações de água para complementar as demandas requeridas pelas culturas.

Tabela 8.35 - Vazões e demandas (em m³/s) de cada reservatório para o cenário Cm7

Mês	Reservatório Tapacurá				Captações	Reservatório Goitá			Reservatório Várzea do Una			
	Qa	Qd	Qirrg	Qevp	Qtc	Qa	Qirrg	Qevp	Qa	Qd	Qirrg	Qevp
Média	3,56	2,53	0,087	0,41	0,96	3,47	0,571	0,13	0,89	0,51	0,143	0,03

A Tabela 8.35 mostra que a vazão Qd de 4,0m³/s destinada ao abastecimento de Recife é atendida (2,53 m³/s a partir do reservatório Tapacurá; 0,96 m³/s pelas captações de Tiúma e Castelo e 0,51 m³/s a partir do reservatório Várzea do Una).

8.1.2.1.4 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO PROCESSO ITERATIVO

Respeitado o nível de tolerância especificado (da ordem de 10⁻⁵), não foi violada qualquer das restrições mensais impostas ao sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una, conforme estabelecidas na seção 5.2.1 do Capítulo 5. Foi atendida a sustentação da vazão ecológica de 0,50 m³/s, a jusante das represas, entre os meses de setembro a fevereiro, como especificado na modelagem.

Não houve vertimentos pelas represas. Quanto às restrições impostas para o controle de cheia, os valores das vazões mensais descarregadas para jusante de cada reservatório ficaram bem abaixo da capacidade do rio Capibaribe.

8.1.2.2 - SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA A SITUAÇÃO CLIMÁTICA SECA

8.1.2.2.1 - AGRICULTURA IRRIGADA

A Tabela 8.36 apresenta as áreas de plantio e receita líquida RL anual otimizada por cenários, culturas e perímetros para a situação climática seca, com destaque para o cenário Cs4 com RL anual (R\$ 24.245.250,00) superior em 0,35% em relação à RL do cenário Cs3 (R\$ 24.161.180,00). Atribui-se este pequeno ganho de RL no cenário Cs4 à condição de não se preservar o volume de espera no mês julho para o reservatório Goitá, e, além disso, à condição da sustentabilidade ter sido amenizada, o que disponibiliza mais água para uso na irrigação.

Na Tabela 8.37 estão apresentadas as áreas irrigadas ótimas para cada perímetro e os percentuais de ocupação da área disponível em cada um deles. Observa-se que no cenário Cs4, o que obteve a maior receita líquida, a área ocupada pela agricultura irrigada representa apenas 18,91% da área total (12.000 ha) planejada no estudo, considerando os três perímetros.

Tabela 8.36 - Área e receita líquida otimizadas por cenário, cultura e perímetro na seca

Cenário Cs3						
Cultura	Perímetro					
	Tapacurá		Goitá		Várzea do Una	
	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)
Banana	-	-	1.499,88	17.701,42	0,03	0,35
Tomate _(s)	-	-	0,08	1,66	299,96	6.222,49
Melancia _(cs)	-	-	32,30	141,78	-	-
Feijão _(s)	5,87	(-1,14)	45,28	(-7,26)	0,02	-
Feijão _(cs)	-	-	-	-	20,35	3,52
Milho	0,02	0,03	-	-	-	-
Algodão _(cs)	-	-	0,02	0,01	0,91	0,37
Cana de açúcar	15,81	6,46	0,04	0,02	231,58	98,12
Área/Perímetro	21,70	-	1.577,60	-	552,87	-
RL / Perímetro	-	5,35	-	17.830,98	-	6.324,85
RL total (RS)	24.161.180,00					
Cenário Cs4						
Cultura	Perímetro					
	Tapacurá		Goitá		Várzea do Una	
	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)	Área (ha)	RL (R\$*1000)
Banana	-	-	1.499,89	17.701,53	0,03	0,35
Tomate _(s)	-	-	0,08	1,66	299,95	6.232,10
Melancia _(cs)	-	-	32,30	141,78	-	-
Feijão _(s)	5,87	(-1,14)	45,28	(-7,26)	0,02	-
Feijão _(cs)	-	-	-	-	20,35	3,52
Milho	0,02	0,03	-	-	-	-
Algodão _(cs)	-	-	0,02	0,01	0,91	0,37
Cana de açúcar	15,81	6,46	0,08	0,04	349,30	152,54
Área/Perímetro	21,70	-	1.577,65	-	670,56	-
RL / Perímetro	-	5,35	-	17.851,02	-	6.388,88
RL total (RS)	24.245.250,00					

Tabela 8.37 - Áreas disponíveis x áreas otimizadas por cenário na situação climática seca

Cenário	Área total disponível (ha)	Área de plantio otimizada (ha)	Ocupação da área disponível (%)
Cs3	12.000	2.152,17	17,93
Cs4	12.000	2.269,91	18,91

Pela aplicação do coeficiente técnico de mão-de-obra usado para colonos em perímetros de irrigação, estimado em 1,00 emprego/ha/ano, pode se cogitar que o subsistema Tapacurá - Goitá - Várzea do Una, no contexto de seca, pode gerar até 2.100 empregos diretos com o desenvolvimento da agricultura irrigada.

A Tabela 8.38 apresenta as vazões médias mensais ótimas para os perímetros Tapacurá, Goitá e Várzea do Una calculadas no processo de otimização na situação climática seca.

Tabela 8.38 - Vazões médias mensais ótimas para os perímetros nos cenários Cs3 e Cs4

Perímetro de irrigação	Cenário Cs3	Cenário Cs4
	Vazão média mensal (m ³ /s)	
Tapacurá	0,010	0,131
Goitá	0,593	0,564
Várzea do Una	0,010	0,010

8.1.2.2.2 - PISCICULTURA

Na Tabela 8.39 estão apresentados os resultados globais otimizados da piscicultura extensiva para nos reservatórios para os cenários da situação climática seca, que não diferem, significativamente. A produção de pescado é menor no Cs4, visto o melhor aproveitamento da água para a irrigação, no caso dos reservatórios Goitá e Várzea do Una.

Tabela 8.39 - Resultados da piscicultura extensiva na situação climática seca

Reservatório	Resultados	Cenário	
		Cs3	Cs4
Tapacurá	Produção anual (t)	48,05	48,05
	Pescadores empregados	32	32
	Receita líquida anual (R\$)	56.456,99	56.456,99
Goitá	Produção anual (t)	7,54	8,83
	Pescadores empregados	5	6
	Receita líquida anual (R\$)	8.863,51	10.378,35
Várzea do Una	Produção anual (t)	2,23	2,23
	Pescadores empregados	1	1
	Receita líquida anual (R\$)	2.625,17	2.625,17
Produção anual de pescado (t)		57,82	59,11
Receita líquida anual da piscicultura (R\$)		67.945,67	69.460,51
Total de pescadores empregados no ano		38	39
Renda per capita média / ano (R\$)		1.788,00	1.781,03

8.2 - RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ACQUANET

A análise de resultados da aplicação do modelo AcquaNet, em base mensal, foi feita em relação aos cenários planejados – C1 a C6, como apresentados na Tabela 7.14 do Capítulo 7. Como não são alterados os volumes iniciais e volumes metas para os reservatórios, visto que a base da simulação são os parâmetros e resultados otimizados pelo ORNAP para cenários com as maiores receitas líquidas advindas da produção agrícola irrigada, o foco das discussões leva mais em conta os resultados sobre o atendimento das diversas demandas, embora que algumas das respostas sobre o desempenho dos reservatórios, entre outros elementos do sistema, também estão comentadas.

8.2.1 - SITUAÇÃO CLIMÁTICA MÉDIA

Na situação climática média, tendo por base os resultados otimizados pelo ORNAP nos cenários Cm4 e Cm5, correspondentes ao sub-sistema Jucazinho-Carpina e sub-sistema Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, respectivamente, a Tabela 8.40 resume a frequência de falhas apuradas no atendimento das demandas definidas.

Tabela 8.40 - Frequência de falhas no atendimento das demandas (situação climática média)

Demandas	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
I. Demandas	Falhas (%)					
Abast JUCZ (abastecimento humano)	0	0	0	0	0	0
Abast Rec1 (abast. do Tapacurá para a ETA)	0	0	0	0	0	0
Abast Rec2 (abast. de Várzea do Una para ETA)	0	0	0	0	0	0
Abast Rec3 (abast. da EEAB Tiúma para a ETA)	0	0	0	0	0	0
Final Mar (demanda final)	100	100	100	100	100	100
Vazão ecológica Jucazinho (Qe Jucz)	0	0	0	0	0	0
Vazão ecológica Carpina (Qe Carp)	0	0	0	0	0	0
Vazão ecológica Goitá (Qe Goitá)	0	0	0	0	0	0
Vazão ecológica Tapacurá (Qe Tapac)	0	0	0	0	0	0
Vazão ecológica Vz. Una (Qe VzUna)	0	0	0	0	0	0
Irrig Trapiá (irrigação do perímetro Trapiá)	46,95	46,96	46,97	46,95	46,96	46,97
Irrig VzPassira (irrigação perímetro Várzeas-Passira)	47,73	47,72	47,73	47,72	47,73	47,73
Irrig Carpina (irrigação do perímetro Carpina)	0	0	0	0	0	0
Irrig Goitá (irrigação do perímetro Goitá)	16,29	16,27	16,29	16,28	16,29	16,28
Irrig Tapacurá (irrigação do perímetro Tapacurá)	16,67	8,33	7,95	8,33	7,95	8,33
Irrig VzUna (irrigação do perímetro Várzea do Una)	6,82	6,82	6,82	6,82	6,82	6,82

Observando os resultados da Tabela 8.40, é interessante comentar o que segue:

- i) todas as demandas do abastecimento humano foram atendidas sem falhas, e foram contempladas de acordo com o especificado, como:

- suprimento da vazão 1,80 m³/s para o Sistema Adutor de Jucazinho (abastecimento humano);
 - regularização de vazão de reforço de 1,5 m³/s, a partir do reservatório Carpina, para o abastecimento de Recife, via EEAB Tiúma/Castelo para o Sistema Tapacurá;
 - suprimento da vazão de 2,20 m³/s para a ETA, a partir do reservatório Tapacurá,
 - suprimento da vazão de 0,50 m³/s para a ETA, a partir do reservatório Várzea do Una.
- ii) atendimento da vazão ecológica de 0,50 m³/s, para todos os cenários;
- iii) a demanda final (Final Mar) não foi atendida em nenhum cenário, o que era de se esperar, uma vez que o valor atribuído para a prioridade Pr foi muito elevado (99);
- iv) as demandas da irrigação apresentaram resultados variáveis, com falhas em vários cenários, exceto para o perímetro Carpina. Vale realçar que no sistema hídrico em estudo, é o perímetro Carpina que detém a menor área potencialmente irrigável (1.800 hectares).

8.2.1.1 - COMPORTAMENTO DOS PERÍMETROS DE IRRIGAÇÃO

O comportamento das demandas por perímetro de irrigação, e por cenário, está apresentado na Tabela 8.41. Nesta tabela, que tem por base o resumo de resultados fornecidos pelo AcquaNet para cada elemento do sistema, estão realçados valores que diferem daqueles apurados para o cenário C1, o que concorre para a obtenção de diferentes valores para os índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, como se verá mais adiante.

Tabela 8.41 – Comportamento das demandas de irrigação por perímetro e por cenário

Demandas da irrigação	Cenário C1			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda requisitada. (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Irrig Trapiá	2,91	46,95	37,791	0,313
Irrig VzPassira	5,73	47,73	127,300	0,674
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,319
Irrig Goitá	1,00	16,29	7,884	1,114
Irrig Tapacurá	1,00	8,33	4,047	0,057
Irrig VzUna	1,00	6,82	1,419	0,041
Demandas da irrigação	Cenário C2			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Irrig Trapiá	2,77	46,96	37,790	0,313
Irrig VzPassira	5,54	47,72	127,30	0,680
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,319
Irrig Goitá	1,00	16,29	7,884	1,114
Irrig Tapacurá	1,09	8,33	4,047	0,057
Irrig VzUna	1,00	6,82	1,419	0,041

Tabela 8.41 (continuação)

Demandas da irrigação	Cenário C3			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm³)	Vazão média fornecida (m³/s)
Irrig Trapiá	3,16	46,97	40,603	0,307
Irrig VzPassira	5,73	47,72	136,682	0,656
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,319
Irrig Goitá	1,00	16,29	7,884	1,114
Irrig Tapacurá	1,09	7,95	3,863	0,057
Irrig VzUna	1,00	6,82	1,419	0,041
Demandas da irrigação	Cenário C4			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm³)	Vazão média fornecida (m³/s)
Irrig Trapiá	2,82	46,97	40,603	0,308
Irrig VzPassira	5,73	47,73	140,335	0,646
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,319
Irrig Goitá	1,00	16,29	7,844	1,114
Irrig Tapacurá	1,00	8,33	4,047	0,057
Irrig VzUna	1,00	6,82	1,419	0,041
Demandas da irrigação	Cenário C5			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm³)	Vazão média fornecida (m³/s)
Irrig Trapiá	2,81	46,97	40,603	0,309
Irrig VzPassira	5,72	47,73	140,335	0,646
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,319
Irrig Goitá	1,02	16,29	7,844	1,114
Irrig Tapacurá	1,00	7,95	3,311	0,066
Irrig VzUna	1,00	6,82	0,946	0,048
Demandas da irrigação	Cenário C6			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm³)	Vazão média fornecida (m³/s)
Irrig Trapiá	2,82	46,97	43,861	0,301
Irrig VzPassira	5,73	47,73	123,621	0,689
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,319
Irrig Goitá	1,02	16,29	7,844	1,114
Irrig Tapacurá	1,00	8,33	3,469	0,065
Irrig VzUna	1,00	6,82	1,419	0,041

8.2.1.2 - COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS E OUTROS ELEMENTOS

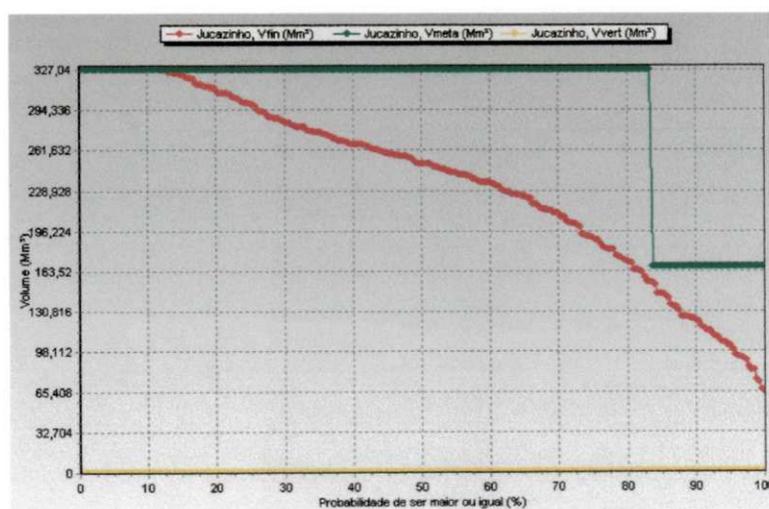
Os volumes iniciais adotados para os reservatórios não tiveram influência nos resultados, assim como os volumes meta definidos, posto que estão com prioridades bem mais baixa de atendimento do que as outras demandas, excetuando-se a demanda “Final Mar”. A Tabela 8.42 apresenta os valores desses volumes.

Tabela 8.42 - Volumes iniciais e volumes metas dos reservatórios (situação climática média)

Reservatório	Volumes (hm ³)			Volume Meta / Volume Máximo
	Máximo	Inicial	Meta	
Jucazinho	327,035	163,517	327,035	1 (*)
Carpina	270,000	81,000	270,000	1 (*)
Tapacurá	98,700	78,960	98,700	1
Goitá	53,000	26,500	53,000	1 (*)
Vázea do Una	11,600	9,280	11,600	1

(*) Excetuando-se os meses onde se define a preservação de volumes de espera.

Como exemplo geral do que foi obtido na simulação quanto ao comportamento dos reservatórios e outros elementos do sistema, algumas ilustrações sobre o desempenho dos mesmos estão apresentadas nas Figuras 8.16 a 8.22, referidas ao cenário C1. Para os demais cenários da situação climática média, como há muita semelhança com o que aqui se apresenta, não vale a pena referenciar, posto se entender que haveria muito de repetição nas ilustrações.

**Figura 8.16** - Curvas de permanência em Jucazinho (volume final, meta e vertido)

Pela Figura 8.16, e outros resultados compilados, é possível apontar: i) foi de 22 meses o intervalo de tempo máximo no qual o volume final do reservatório Jucazinho ficou abaixo do volume meta; ii) a frequência abaixo do volume meta foi de 79,17%; iii) não houve vertimentos no reservatório; iv) o patamar de volume meta correspondente a quase 167,0 hm³, corresponde ao número de meses em que é exigida a preservação do volume de espera no reservatório, ou seja o modelo atendeu essa restrição.

Na Figura 8.18, os resultados da simulação par o reservatório Carpina podem ser assim resumidos: i) o período de tempo máximo abaixo do volume meta foi de 23 meses; ii) a frequência abaixo do volume meta foi de 79,55 %; c) não houve vertimentos no reservatório; iv) a vazão efluente média mensal é da ordem de 4,74 m³/s, com máxima descarga de 167,63

m^3/s , o que fica abaixo de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, que é vazão máxima a ser liberada para o controle de cheias.

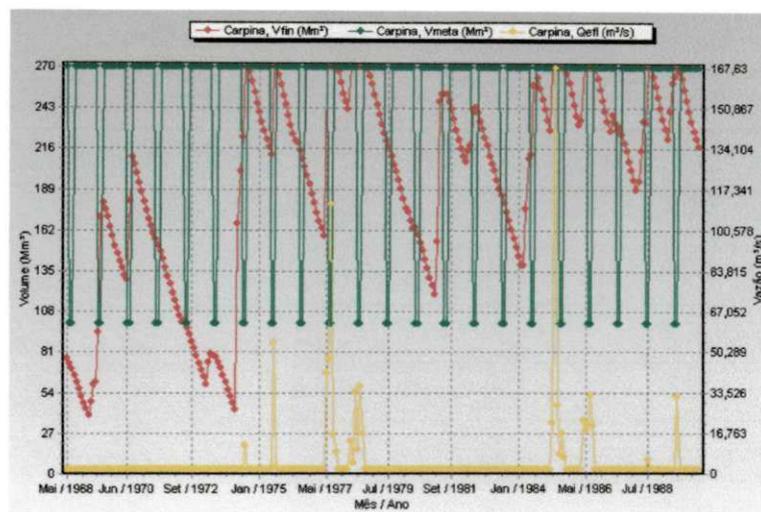


Figura 8.17 - Volume finais, volume meta e vazões efluentes do Carpina



Figura 8.18 - Curva de permanência no Goitá (volumes finais, meta e evaporado)

Pela Figura 8.18, junto a outros resultados, é possível apontar: i) o período de tempo máximo abaixo do volume meta foi de 10 meses; ii) a frequência abaixo do volume meta foi de 62,55 %; iii) não houve vertimentos no reservatório; iv) a evaporação média mensal foi estimada em $0,75 \text{ hm}^3/\text{mês}$; v) o patamar de volume meta correspondente a $26,5 \text{ hm}^3$, corresponde ao número de meses em que é preservado o volume de espera no reservatório, ou seja, o modelo atende a restrição estabelecida.

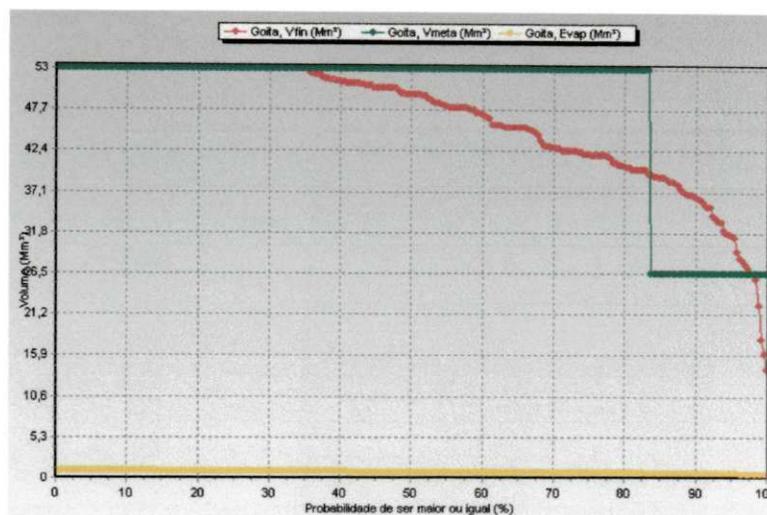


Figura 8.19 - Curva de permanência no Tapacurá (volume final, meta e evaporação).

Pela Figura 8.19, e outros resultados, é possível considerar: i) o período de tempo máximo abaixo do volume meta foi de 58 meses; ii) a frequência abaixo do volume meta foi de 77,65 %; iii) não houve vertimentos no reservatório; iv) a evaporação média mensal foi da ordem de $1,13 \text{ hm}^3/\text{mês}$.

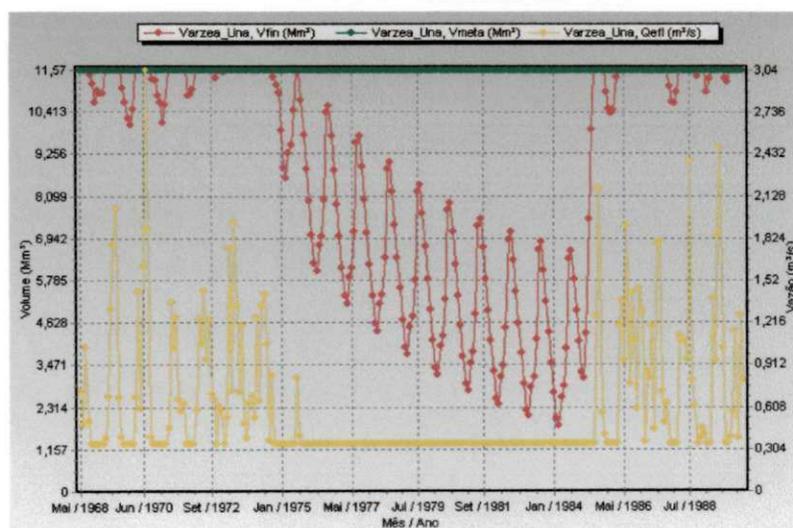


Figura 8.20 - Volume finais, volume meta e vazões efluentes do Várzea do Una.

Pela Figura 8.20, e outros dados obtidos, os resultados da simulação podem ser assim resumidos para Várzea do Una: i) o período de tempo máximo inferior ao volume meta foi de 116 meses, denotando, dado o seu pequeno volume de acumulação, o comprometimento desse reservatório no atendimento das demandas do abastecimento de Recife; ii) a frequência abaixo do volume meta foi de 61,36 %; c) não houve vertimentos no reservatório; iv) a vazão

efluente média mensal foi calculado em $3,13 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando evaporação, irrigação e abastecimento.

Outros elementos importantes do sistema podem ter seu desempenho avaliado, como se ilustra na Figura 8.21, para o caso da EEAB de Tiúma/Castelo, demonstrando ser de 100% a probabilidade do atendimento da vazão de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, como foi especificado, considerado o aporte da vazão regularizada de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a partir do reservatório de Carpina.

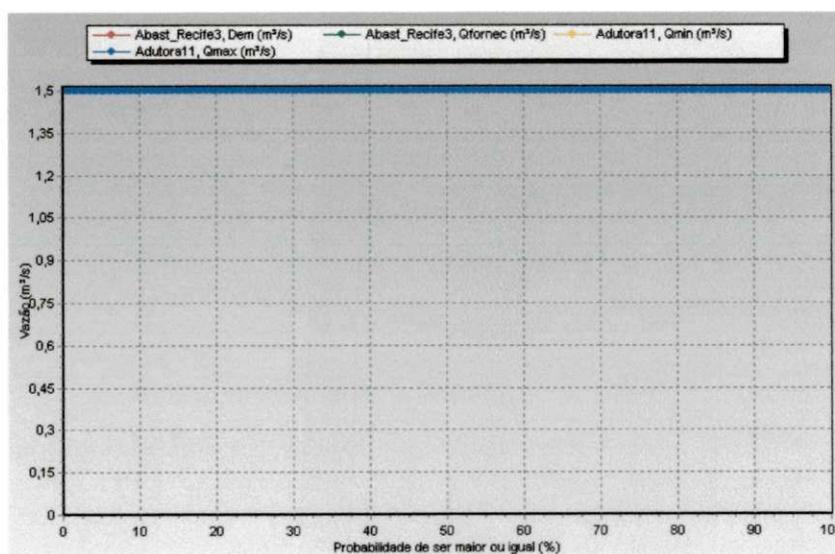


Figura 8.21 - Curva de permanência de vazões na EEAB Tiúma e Castelo

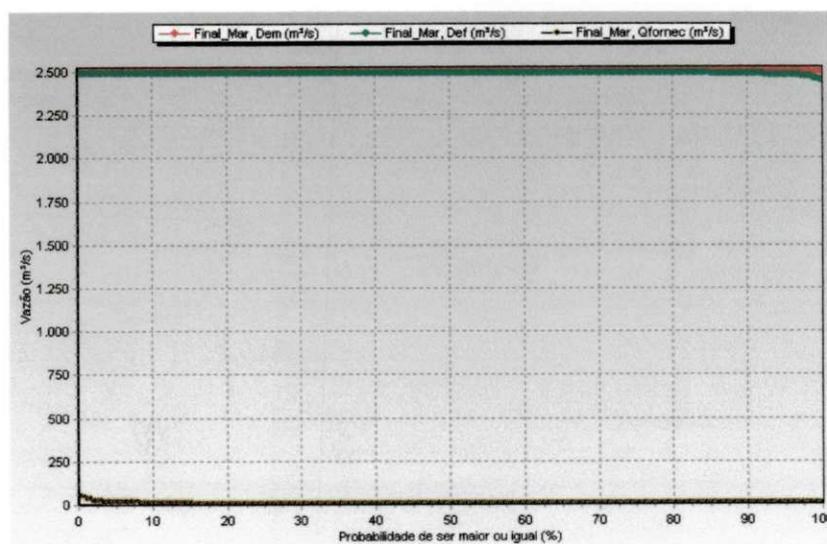


Figura 8.22 - Curva de permanência de demandas no nó FinalMar

Pela Figura 8.22, e outros resultados obtidos, pode-se resumir para a questão das demandas no nó FinalMar: i) o período de tempo máximo abaixo da demanda necessária foi de 264 meses, ou seja uma frequência de 100% para o não atendimento da demanda de

2.500m³/s, comprovando que o modelo prioriza o atendimento das outras demandas do sistema; ii) a vazão efluente média mensal foi calculado em 3,13 m³/s; iii) para o arco “RioCapib6”, trecho de rio a montante do nó de demanda final, fluiria uma vazão média de 7,4 m³/s, com mínima de 4,5 m³/s, o que garante, respectivamente, o controle de cheias e a permanência da vazão ecológica no rio Capibaribe.

8.2.1.3 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA HÍDRICO

Como os usos principais da água foram atendidos, principalmente as vazões destinadas ao abastecimento do Sistema Adutor de Jucazinho (1,80 m³/s) e do abastecimento de Recife, via Sistema Tapacurá (4,0 m³/s), a avaliação de desempenho de todo o sistema hídrico, através dos cenários idealizados, pode se restringir ao comportamento das demandas da irrigação, fazendo-se uso dos indicadores de performance, confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Estes índices de sustentabilidade, para cada cenário, foram calculados pelas equações 5.30 a 5.32, apresentadas na seção 5.4 do Capítulo 5.

8.2.1.3.1 - CONFIABILIDADE

A probabilidade de atendimento das demandas da irrigação pôde ser analisada a partir da utilização do indicador de confiabilidade, já considerada a tolerância de 2% como margem de falha aceita, como definida para a modelagem. Fez-se a relação entre o somatório dos meses com demandas atendidas (sistema em estado satisfatório) e o total de meses do período simulado. Os resultados obtidos para o índice de confiabilidade, C, estão apresentados na Tabela 8.42. No caso do perímetro Carpina, observa-se ser de 100% a confiabilidade para atendimento das vazões médias mensais otimizadas pelo ORNAP, em todos os cenários.

Tabela 8.43 - Confiabilidade dos pontos de demandas nos cenários (climática média)

Demandas	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Confiabilidade C (%)					
Irrig Trapiá (irrigação perímetro Trapiá)	53,79	53,79	47,35	53,03	53,03	53,03
Irrig VzPassira (irrigação perímetro Vz.Passira)	52,27	51,89	52,27	52,27	52,27	52,27
Irrig Carpina (irrigação perímetro Carpina)	100	100	100	100	100	100
Irrig Goitá (irrigação perímetro Goitá)	84,09	84,09	84,09	83,71	83,71	83,70
Irrig Tapacurá (irrigação perímetro Tapacurá)	91,67	90,91	92,05	91,67	91,67	91,67
Irrig VzUna (irrigação perímetro Vz. do Una)	93,18	93,56	93,18	93,19	93,18	93,18

8.2.1.3.2 - RESILIÊNCIA

Dado que o sistema hídrico se encontra em falha, é interessante saber por quanto tempo ele se comportará dessa maneira. Para avaliar a capacidade de recuperação do sistema, fez-se uma análise do índice de resiliência, R, cujos valores estão apresentados na Tabela 8.44.

Tabela 8.44 - Resiliência dos pontos de demandas nos cenários (situação climática média)

Demandas	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Resiliência R (%)					
Irrigação do perímetro Trapiá	34,43	36,07	31,65	35,48	35,48	35,48
Irrigação do perímetro Várzeas-Passira	17,46	17,32	17,46	17,46	17,46	17,46
Irrigação do perímetro Carpina	100	100	100	100	100	100
Irrigação do perímetro Goitá	100	100	100	100	97,67	97,67
Irrigação do perímetro Tapacurá	100	91,67	91,67	100	100	100
Irrigação do perímetro Várzea do Una	100	100	100	100	100	100

Pela Tabela 8.44, em todos os cenários, observam-se baixas capacidades para recuperação no atendimento das demandas dos perímetros Trapiá e Várzeas-Passira, sendo que este último é o que detém a maior área (6.750 ha) potencialmente irrigável, em todo o sistema hídrico.

8.2.1.3.3 - VULNERABILIDADE

Os resultados dos indicadores de vulnerabilidade, V, estão apresentados na Tabela 8.45. A melhor situação é apresentada quando a vulnerabilidade é mínima, ou zero.

Tabela 8.45 - Vulnerabilidade dos pontos de demandas nos cenários (climática média)

Demandas	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Vulnerabilidade V (%)					
Irrigação do perímetro Trapiá	29,10	27,79	26,07	25,88	29,54	31,84
Irrigação do perímetro Várzeas-Passira	35,32	35,15	34,01	39,25	39,86	34,23
Irrigação do perímetro Carpina	0	0	0	0	0	0
Irrigação do perímetro Goitá	6,15	6,15	6,32	6,26	6,03	7,87
Irrigação do perímetro Tapacurá	58,33	56,18	53,59	58,90	46,25	46,14
Irrigação do perímetro Várzea do Una	50,12	47,55	50,12	51,44	48,62	45,23

Pela Tabela 8.45, é possível identificar que, seguindo os resultados do perímetro Carpina, o perímetro Goitá é o que apresenta baixa vulnerabilidade, indicando menores déficits no atendimento das demandas de irrigação. Os maiores valores para a vulnerabilidade correspondem aos pontos de demanda de irrigação referidos aos reservatórios Tapacurá e

Goitá, o que era de se esperar, visto o forte compromisso que os mesmos tem com o abastecimento de Recife. No caso do Tapacurá, que garante, por si só, quase 60% da demanda que vai para ETA, a vulnerabilidade para atender as vazões de irrigação é bem mais acentuada, com máximo de quase 59% no caso do cenário C4. A menor vulnerabilidade, no caso do perímetro Várzeas-Passira, corresponde ao cenário C4.

8.2.1.3.4 - SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade relativa, S , do sistema, quanto ao atendimento das demandas de irrigação, é obtida pela combinação dos valores dos índices apresentados das Tabelas 8.43 a 8.45, pela aplicação da Equação 5.33, apresentada na seção 5.4.4 do Capítulo 5. A Tabela 8.46 apresenta valores da sustentabilidade para cada demanda de irrigação, por cenário e por perímetro irrigado.

Tabela 8.46 - Sustentabilidade das demandas de irrigação na situação climática média

Perímetro	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Sustentabilidade S (%)					
Trapiá	13,10	14,00	11,10	14,00	13,20	12,80
Várzeas-Passira	5,90	5,80	6,00	5,60	5,50	6,00
Carpina	100	100	100	100	100	100
Goitá	78,90	78,90	78,80	78,50	76,80	75,30
Tapacurá	40,50	36,50	39,20	37,70	49,50	49,40
Várzea do Una	46,50	49,10	46,50	45,30	47,90	51,00

Para definir o provável benefício, em reais, considerados os cenários de melhores resultados obtidos pelo ORNAP, multiplica-se a sustentabilidade, S , de cada demanda de irrigação, pela receita líquida potencial (RL) anual advinda da produção agrícola irrigada para cada perímetro, como estão re-apresentadas na Tabela 8.47. Em seguida, faz-se o somatório das parcelas resultantes da multiplicação para cada cenário testado pelo AcquaNet. A Tabela 8.48 apresenta os prováveis benefícios de cada cenário idealizado para a simulação pelo modelo AcquaNet.

Tabela 8.47 - Receita líquida, RL, potencial anual otimizada (cenários do ORNAP)

Perímetro	Cenário Cm4	Perímetro	Cenário Cm5
	RL (R\$)		RL (R\$)
Trapiá	14.103.520,00	Goitá	17.717.870,00
Várzeas-Passira	40.411.950,00	Tapacurá	8.308.000,00
Carpina	20.076.500,00	Várzea do Una	6.235.720,00
Total RL _{Cm4} (R\$)	74.591.970,00	Total RL _{Cm5} (R\$)	32.261.590,00

Tabela 8.48 - Benefício de cada cenário em função do critério de sustentabilidade

Cenário	Provável benefício (R\$)	Cenário	Provável benefício (R\$)
C1	44.566.015,07	C4	44.132.492,32
C2	44.484.330,61	C5	44.873.651,10
C3	44.192.824,75	C6	44.946.216,36

De posse dos valores da Tabela 8.48, é possível avaliar que o melhor cenário de alocação ótima de água para atender as demandas da irrigação é o cenário C6, que conferiu prioridades de atendimento de Pr =10 para os perímetros Trapiá e Goitá; Pr = 8 para os perímetros Várzeas-Passira e Tapacurá, e Pr = 6 para os perímetros Carpina e Várzea do Una. Mesmo se tratando de uma situação hipotética, onde as vazões mensais para a irrigação foram consideradas pelos resultados ótimos obtidos pelo ORNAP, mantidos fixos volumes metas e outros parâmetros físicos do sistema, o critério de sustentabilidade se mostra interessante vez que, hierarquizando os indicadores de desempenho, permite definir os melhores valores de prioridades para atender as demandas de irrigação, subsidiando políticas de preferências para a operação do sistema hídrico.

8.2.2 - SITUAÇÃO CLIMÁTICA SECA

Na situação climática seca, tem-se por base resultados otimizados dos cenários Cs2 e Cs4, referidos ao sub-sistema Jucazinho-Carpina e ao sub-sistema Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, respectivamente. Os resultados obtidos pelo modelo ORNAP, no caso do sub-sistema Jucazinho-Carpina, consideram o período hidrológico 1956/57 a 1991/92, dentro da série histórica 1957- 1992 (36 anos). A severidade dessa seca não se repete entre os anos de 1968 a 1989, período com dados comuns aos dois sub-sistemas hídricos, como foi trabalhado no AquaNet.

Em razão disso, e até pelo que de conservador pode representar na análise do desempenho da produção agrícola irrigada para uma situação de seca, adotou-se na simulação dessa situação pelo AcquaNet, no caso dos reservatórios Jucazinho e Carpina, as séries de vazões médias mensais afluentes do período 1956/57 a 1959/1960, e as vazões médias mensais otimizadas para a irrigação dos perímetros Trapiá, Várzea-Passira e Carpina, no cenário Cs2. No caso do sub-sistema Tapacurá-Goitá-Várzea do Una (cenário Cs4 do ORNAP) o período de seca (1968/69 -1970/71) está contemplado na série 1968-1989, adotada na simulação.

Todas as demandas do abastecimento humano foram atendidas sem falhas, ou seja: i) vazão 1,80 m³/s para o Sistema Adutor de Jucazinho (abastecimento humano); ii) regularização de vazão de reforço de 1,0 m³/s, a partir do reservatório Carpina, para o

abastecimento de Recife, via EEAB Tiúma/Castelo; iii) suprimento da vazão de 3,00 m³/s para a ETA, a partir do sistema Tapacurá (Tapacurá garantido a vazão de 2,0 m³/s e Várzea do Una a vazão de 0,5 m³/s). Também foi atendida a vazão ecológica de 0,50 m³/s para todos os cenários. A demanda final (Final Mar) não foi atendida em nenhum cenário, o que era de se esperar, a exemplo do que aconteceu na situação climática média.

8.2.2.1 - COMPORTAMENTO DOS PERÍMETROS DE IRRIGAÇÃO

As demandas da irrigação apresentaram resultados variáveis, com falhas em vários cenários, exceto para os perímetros Carpina e Várzea do Una, como está apresentado na Tabela 8.49. Nesta tabela estão realçados, em negrito, valores que diferem daqueles do cenário C1.

Tabela 8.49 – Resumo das demandas de irrigação por perímetro e por cenário (seca)

Demandas da irrigação	Cenário C1			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Irrig Trapiá	3,20	33,33	4,310	0,112
Irrig VzPassira	6,00	50,00	17,029	0,554
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,313
Irrig Goitá	1,00	4,17	1,577	0,702
Irrig Tapacurá	1,00	8,33	0,210	0,202
Irrig VzUna	0	0,000	0,000	0,041
Demandas da irrigação	Cenário C2			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Irrig Trapiá	3,20	33,33	4,704	0,104
Irrig VzPassira	6,00	50,00	18,291	0,535
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,313
Irrig Goitá	1,00	4,17	1,577	0,702
Irrig Tapacurá	1,14	16,67	0,420	0,196
Irrig VzUna	0	0,00	0,000	0,041
Demandas da irrigação	Cenário C3			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Irrig Trapiá	3,20	33,33	4,704	0,104
Irrig VzPassira	6,00	50,00	17,029	0,554
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,313
Irrig Goitá	1,00	4,17	1,577	0,702
Irrig Tapacurá	1,00	8,33	0,210	0,202
Irrig VzUna	0	0,00	0,000	0,050

Tabela 8.49 (continuação)

Demandas da irrigação	Cenário C4			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm³)	Vazão média fornecida (m³/s)
Irrig Trapiá	3,20	33,33	4,310	0,112
Irrig VzPassira	6,00	50,00	19,027	0,524
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,313
Irrig Goitá	1,00	4,17	1,577	0,702
Irrig Tapacurá	1,00	8,33	0,105	0,212
Irrig VzUna	0	0,00	0,000	0,041
Demandas da irrigação	Cenário C5			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm³)	Vazão média fornecida (m³/s)
Irrig Trapiá	3,20	33,33	4,704	0,104
Irrig VzPassira	6,00	50,00	17,029	0,554
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,313
Irrig Goitá	1,00	4,18	1,587	0,698
Irrig Tapacurá	1,00	8,32	0,211	0,202
Irrig VzUna	0	0,00	0,000	0,042
Demandas da irrigação	Cenário C6			
	Tempo médio de permanência em situação de falha (mês)	Frequência abaixo da demanda (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm³)	Vazão média fornecida (m³/s)
Irrig Trapiá	3,20	33,32	4,310	0,112
Irrig VzPassira	6,00	54,17	19,395	0,516
Irrig Carpina	0	0,00	0,000	0,313
Irrig Goitá	1,00	4,17	1,577	0,700
Irrig Tapacurá	1,00	8,32	0,211	0,202
Irrig VzUna	0	0,00	0,000	0,041

8.2.2.2 - COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS E OUTROS ELEMENTOS

Os volumes máximo, inicial e de meta definidos para os reservatórios, como apresentados na Tabela 8.50, não influenciaram nos resultados, dado que estão com prioridade bem mais baixa de atendimento do que as outras demandas, excetuando-se a demanda “Final Mar”. Na situação climática seca, representada pelos cenários Cs2 e Cs4 do ORNAP, não se preserva volumes de espera nos reservatórios.

Tabela 8.50 - Volumes iniciais e volumes metas dos reservatórios (situação climática seca)

Reservatório	Volumes (hm³)			Volume Meta / Volume Máximo (%)
	Máximo	Inicial	Meta	
Jucazinho	327,035	163,517	327,035	100
Carpina	270,000	81,000	270,000	100
Tapacurá	98,700	78,960	98,700	100
Goitá	53,000	26,500	53,000	100 *
Vázea do Una	11,600	5,800	11,600	100

Ilustrações e comentários sobre o desempenho dos reservatórios e outros elementos do sistema, referidos ao cenário C1 na situação climática seca, podem ser destacados.

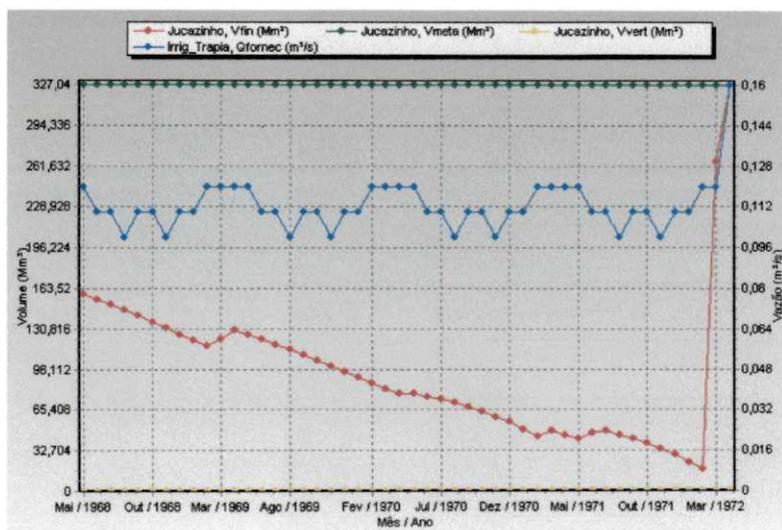


Figura 8.23- Reservatório Jucazinho (Volume final e de meta, vazão para irrigação de Trapia, volumes vertidos).

Chama a atenção na Figura 8.23 uma acentuada depleção do reservatório Jucazinho, com volume chegando a $23,250 \text{ hm}^3$, ao final do período de seca, pouco superior ao mínimo de $16,811 \text{ hm}^3$, como foi definido no estudo. Os volumes acumulados estiverem sempre abaixo de volume meta, não havendo sangrias no período. Semelhante desempenho se observa para o reservatório Carpina, conforme Figura 8.24, registrando-se que o volume acumulado, ao final o mês de fevereiro, atinge o mínimo $11,51 \text{ hm}^3$, recuperando-se diante das afluições que ocorrem em abril e março, com valores médios mensais de $28,180 \text{ m}^3/\text{s}$ e $13,580 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

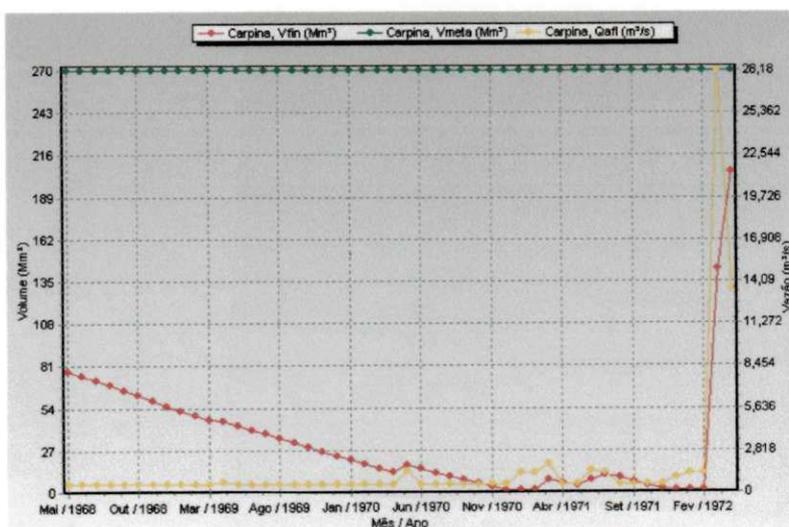


Figura 8.24 – Comportamento do reservatório Carpina (situação de seca)

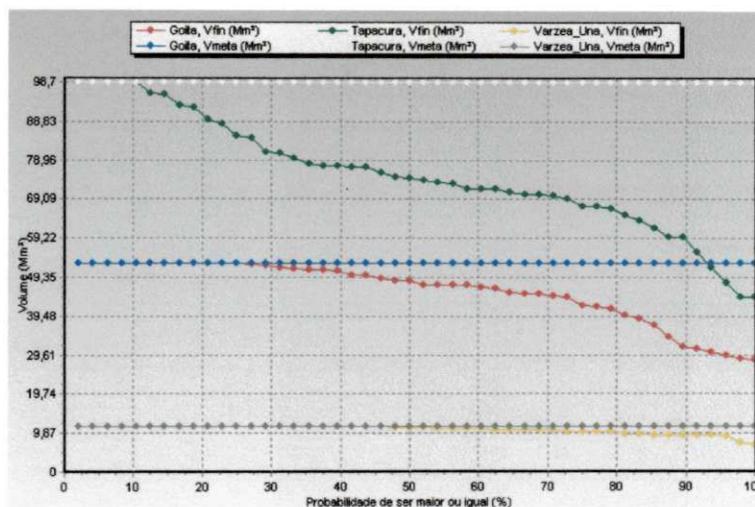


Figura 8.25 - Curvas de permanência nos reservatórios Goitá, Tapacurá e Várzea do Una (volume final, volume meta).

Pela Figura 8.25, percebe-se um melhor desempenho dos reservatórios Goitá, Tapacurá e Várzea do Una, mesmo sendo um período de seca, dado as baixas vazões fixadas para os perímetros de irrigação, associado que nas respectivas áreas de drenagem o regime de chuvas e de vazões favorece a recuperação e manutenção de maiores volumes de acumulação nas represas, diferentemente do que ocorre nas sub-bacias dos reservatórios Jucazinho e Carpina, encravadas na região agreste semi-árido da bacia do Capibribe.

8.2.2.3 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA HÍDRICO

Como os usos principais da água foram atendidos, principalmente as vazões destinadas ao abastecimento do Sistema Adutor de Jucazinho ($1,80 \text{ m}^3/\text{s}$) e do abastecimento de Recife, via Sistema Tapacurá ($3,0 \text{ m}^3/\text{s}$), a avaliação de desempenho de todo o sistema hídrico dar-se-á pelas demandas da irrigação.

8.2.2.3.1 - CONFIABILIDADE

Os resultados obtidos para o índice de confiabilidade, C , estão apresentados na Tabela 8.51. No caso dos perímetros Carpina e Várzea do Una, observa-se ser de 100% a confiabilidade para atendimento das vazões médias mensais otimizadas pelo ORNAP, em todos os cenários da situação climática seca. Para alguns cenários, a confiabilidade de atendimento das demandas de irrigação são superiores àquelas da situação climática média, o que era esperado, a exceção do perímetro Várzeas-Passira. Menores áreas plantadas ótimas nos perímetros, como obtidas pelo ORNAP, resultam menores vazões suplementares para atender

as necessidades das culturas, aumentando a confiabilidade e resiliência, ao mesmo tempo reduzindo a vulnerabilidade de atender as demandas de irrigação.

Tabela 8.51 - Confiabilidade dos pontos de demandas nos cenários (situação climática seca)

Demandas	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Confiabilidade C (%)					
Irrig Trapiá (irrigação perímetro Trapiá)	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67
Irrig VzPassira (irrigação perímetro Vz.Passira)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Irrig Carpina (irrigação perímetro Carpina)	100	100	100	100	100	100
Irrig Goitá (irrigação perímetro Goitá)	95,83	95,83	95,83	95,83	95,83	95,83
Irrig Tapacurá (irrigação perímetro Tapacurá)	91,67	83,33	91,67	91,67	91,67	91,67
Irrig VzUna (irrigação perímetro Vz. do Una)	100	100	100	100	100	100

8.2.2.3.2 - RESILIÊNCIA

Dado que o sistema hídrico se encontra em falha, é interessante saber por quanto tempo ele se comportará dessa maneira. Para avaliar a capacidade de recuperação do sistema, fez-se uma análise do índice de resiliência, R, cujos valores estão apresentados na Tabela 8.52.

Tabela 8.52 - Resiliência dos pontos de demandas nos cenários (situação climática seca)

Demandas	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Resiliência R (%)					
Irrigação do perímetro Trapiá	31,25	31,25	31,25	31,25	31,25	31,25
Irrigação do perímetro Várzeas-Passira	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67
Irrigação do perímetro Carpina	100	100	100	100	100	100
Irrigação do perímetro Goitá	100	100	100	100	100	100
Irrigação do perímetro Tapacurá	100	87,50	100	100	100	100
Irrigação do perímetro Várzea do Una	100	100	100	100	100	100

Pela Tabela 8.52, observa-se que os valores apresentados para os cenários, indicam que o sistema tem alta resiliência, significando boa capacidade de recuperação, com ressalvas para os pontos de demandas para os perímetros Trapiá e Várzeas-Passira.

8.2.2.3.3 - VULNERABILIDADE

Os resultados dos indicadores de vulnerabilidade V estão apresentados na Tabela 8.53. A melhor situação é apresentada quando a vulnerabilidade é mínima, ou zero.

Tabela 8.53 - Vulnerabilidade dos pontos de demandas nos cenários (situação climática seca)

Demandas	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Vulnerabilidade V (%)					
Irrigação do perímetro Trapiá	36,58	41,64	22,29	35,68	41,64	36,68
Irrigação do perímetro Várzeas-Passira	31,36	31,36	31,36	35,22	31,36	36,03
Irrigação do perímetro Carpina	0	0	0	0	0	0
Irrigação do perímetro Goitá	26,30	26,32	26,32	26,31	26,32	26,32
Irrigação do perímetro Tapacurá	8,70	8,90	6,78	4,35	8,70	6,52
Irrigação do perímetro Várzea do Una	0	0	0	0	0	0

Pela Tabela 8.53, observa-se que não há vulnerabilidades para atendimento das demandas dos perímetros Carpina e Várzea do Una. O perímetro Tapacurá apresenta baixa vulnerabilidade, indicando menores déficits no atendimento das demandas de irrigação, quando comparado com as respostas para a situação climática média. As maiores vulnerabilidades estão apontadas nos pontos de demandas de irrigação sustentadas pelo reservatório Jucazinho, onde o Perímetro Várzeas-Passira é o maior em área potencialmente irrigável (6.750 ha) e o de maior área cultivada otimizada pelo ORNAP.

8.2.2.3.4 - SUSTENTABILIDADE

Os dados dos índices apresentados das Tabelas 8.51 a 8.53 permitem calcular valores para a sustentabilidade S, dada pela Equação 5.33, da seção 5.4.1 do Capítulo 5, como apresentados na Tabela 8.54, para cada demanda de irrigação, por perímetro.

Tabela 8.54 - Sustentabilidade das demandas de irrigação na situação climática seca

Perímetro	Cenário					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Sustentabilidade S (%)					
Trapiá	13,20	12,10	16,20	13,40	12,10	13,20
Várzeas-Passira	5,70	5,70	5,70	5,40	5,70	5,30
Carpina	100	100	100	100	100	100
Goitá	70,60	70,60	70,60	70,60	70,60	70,60
Tapacurá	83,70	66,40	85,50	87,70	83,70	85,70
Várzea do Una	100	100	100	100	100	100

Multiplicando-se a sustentabilidade S de cada demanda pela receita líquida RL anual advinda da produção agrícola irrigada, em cada perímetro, e fazendo o somatório, pode ser definido o provável benefício, em reais, para cada cenário. Portanto, estabelecendo-se quais os melhores critérios de prioridades de atendimento das demandas de irrigação. As receitas

líquidas dos cenários Cs2 e Cs4, dadas pelo ORNAP, só para lembrar o que foi tratado na seção 8.1 deste Capítulo, estão re-apresentadas na Tabela 8.55.

Tabela 8.55 - Receitas líquidas RL anuais otimizadas (cenários do ORNAP)

Perímetro	Cenário Cs2	Perímetro	Cenário Cs4
	RL (R\$)		RL (R\$)
Trapiá	6.795.290,00	Goitá	17.830.980,00
Várzeas-Passira	32.795.220,00	Tapacurá	5.350,00
Carpina	19.538.910,00	Várzea do Una	6.235.720,00
Total RL _{Cs2} (R\$)	59.159.420,00	Total RL _{Cs4} (R\$)	24.072.050,00

Uma interessante característica de sistemas hídricos é sua capacidade de suprir as demandas de forma satisfatória diante das incertezas futuras. Em períodos de seca, como no caso aqui considerado, o critério da sustentabilidade pode identificar as melhores alternativas de usos múltiplos das disponibilidades hídricas dos reservatórios, mediante definição de prioridades operacionais.

Na Tabela 8.56 estão apresentados os prováveis benefícios de cada cenário, observado o critério de sustentabilidade para as demandas de irrigação, que pode subsidiar políticas de preferências para a operação do sistema.

Tabela 8.56 - Benefício de cada cenário em função do critério de sustentabilidade

Cenário	Provável benefício (R\$)	Cenário	Provável benefício (R\$)
C1	41.148.616,55	C4	41.054.140,29
C2	41.076.169,94	C5	41.073.676,42
C3	41.347.285,01	C6	41.016.009,16

Observados os valores da Tabela 8.56, é possível avaliar que o melhor cenário de alocação de água para atender as demandas da irrigação é o cenário C3, que conferiu prioridades de atendimento de $Pr = 8$ para os perímetros Trapiá e Goitá; $Pr = 6$ para os perímetros Várzea-Passira e Tapacurá, e $Pr = 10$ para os perímetros Carpina e Várzea do Una.

Mesmo se tratando de uma situação hipotética, onde as vazões mensais para a irrigação foram consideradas pelos resultados ótimos obtidos pelo ORNAP, mantidos fixos volumes metas e outros parâmetros físicos do sistema, o uso do critério de sustentabilidade se mostra importante vez que, hierarquizando os indicadores de desempenho, permite definir os melhores valores de prioridades para atender as demandas de irrigação, permitindo subsidiar políticas de preferências para a operação do sistema hídrico.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Apresentou-se neste trabalho uma abordagem metodológica que combina técnicas de otimização e simulação, o uso de indicadores de desempenho e aplicação de critério de sustentabilidade para classificação de cenários de planejamento e seleção de alternativas, visando subsidiar a análise da operação integrada e a alocação ótima das águas de um sistema de recursos hídricos formado pelos reservatórios Jucazinho, Carpina, Goitá, Tapacurá e Várzea de Una, e perímetros de irrigação, quando sujeito à usos e objetivos múltiplos.

A operação integrada ótima do sistema hídrico estudado reveste-se de grande importância sócio-econômica para a bacia do rio Capibaribe, uma das principais bacias de um dos estados de maior déficit hídrico do Brasil. O desenvolvimento da região de influência dos reservatórios, necessariamente, deve contemplar a otimização do uso múltiplo das disponibilidades hídricas já existentes, visando atender o consumo humano e dessedentação animal, a produção de alimentos (irrigação, pesca extrativa) e o uso industrial, favorecendo a geração de emprego e renda, o uso ecológico e o controle de cheias no rio Capibaribe.

As conclusões derivadas das análises e apreciações elaboradas ao longo do estudo podem ser destacadas, como a seguir.

❖ A importância do estudo de otimização evidenciou-se na determinação da vazão mensal ótima a ser liberada de cada reservatório para atender às demandas de irrigação dos perímetros, enfatizando-se que o modelo ORNAP aloca áreas de plantio, prioritariamente, para culturas de maior retorno financeiro. Outros resultados podem ser listados:

- Para o sub-sistema Jucazinho-Carpina, observada a situação climática média, o desempenho ótimo da agricultura irrigada é verificado no cenário Cm4, com ocupação de 43,64% da área de 13.050ha potencialmente apta para plantio.
- Para o sub-sistema Tapacurá - Goitá - Várzea do Una, vista a situação climática média, o desempenho ótimo da agricultura irrigada (cenário Cm5) corresponde a uma alocação de apenas 18,35% da área total planejada no estudo.
- Observada a situação climática seca, conclui-se que, para o sub-sistema Jucazinho-Carpina, a área ótima ocupada pela agricultura irrigada (cenário Cs2) representa 31,21% da área potencialmente apta para plantio, podendo oportunizar a geração de 4.000

empregos diretos. No caso do sub-sistema Tapacurá - Goitá - Várzea do Una, essa mesma área representa apenas 18,91% da área total de plantio planejada no estudo (cenário Cs4), o que pode oportunizar a geração de 2.250 empregos diretos.

- Os resultados otimizados obtidos neste trabalho mostraram que as áreas máximas cogitadas para os perímetros não são, totalmente, factíveis de serem beneficiadas com irrigação. Nos planos do DNOCS, conforme documentação consultada, que diz respeito exclusivamente ao uso das águas do reservatório Jucazinho, está prevista a irrigação de cerca de 6.750 ha a jusante, em terras situadas às margens do rio Capibaribe, não considerando o perímetro Trapiá.
- Caso a prática da irrigação intensiva seja planejada para a região de estudo, principalmente no caso de culturas perenes, deve-se planejar o plantio com base nas disponibilidades hídricas para a uma situação de seca, com vistas a garantir o atendimento da demanda agrícola e assegurar retorno financeiro à atividade.
- O reservatório Carpina, para uma acumulação de 100.000.000 m³, como definido neste estudo, pode suprir uma vazão de 1,0 m³/s para reforço do abastecimento de Recife, o que se impõe diante do déficit hídrico atual e perspectiva de aumento das demandas para os próximos anos. A vazão de reforço pode ser derivada pela descarga de fundo, favorecendo melhor condição operacional às captações Tiúma e Castelo, a jusante, porém deixaria a massa de água sujeita à poluição atualmente observada na parte baixa do rio Capibaribe, razão do lançamento de despejos domésticos, efluentes industriais e esgotos sanitários não tratados. Outra possibilidade seria aduzir a vazão de reforço de 1,0 m³/s diretamente para a ETA Marechal Castelo Branco, via adutora a ser projetada que, certamente, minimizará a perda física e os custos de tratamento da água inerentes à primeira alternativa.
- Em todos os cenários, o reservatório Goitá, mesmo sendo operado a partir de um volume inicial correspondente a 50% da capacidade de acumulação, teve desempenho operacional satisfatório, preservados o volume de espera e a sustentabilidade hídrica, sem atingir o volume mínimo definido como restrição do modelo. Em razão disso, é possível cogitar que este reservatório venha a ser empregado no atendimento, além da irrigação, de demandas hídricas de cidades próximas como Gloria do Goitá e Chã de Alegria, atualmente com problemas na oferta de água para a população.
- A piscicultura extensiva nos reservatórios, atividade capaz de promover melhorias na condição sócio-econômica da região, deve ser incentivada. Para uma condição de normalidade climática, como verificado nos cenários Cm4 e Cm5, a produção de pescado nos cinco reservatórios pode chegar a 220,00 toneladas/ano, dando emprego a 150

pescadores. Ressalve-se, entretanto, que a piscicultura extensiva nos reservatórios deve ser controlada para evitar prejuízos à qualidade da água para o abastecimento humano.

❖ Os resultados obtidos com a análise integrada do sistema recursos hídricos através do modelo de simulação demonstram que, em todos os cenários planejados, as vazões do abastecimento humano, e vazão ecológica, foram atendidas sem falhas, seja na situação climática média, seja na seca. A avaliação de desempenho de todo o sistema hídrico deu-se pela análise do atendimento às demandas da irrigação, que apresentaram resultados variáveis, com falhas em vários cenários. Outros resultados podem ser relevados, como a seguir.

- A determinação de diferentes níveis de prioridades estabelecidos na modelagem de simulação forneceu resultados interessantes, que podem subsidiar regras de operação dos reservatórios, observada a topologia adotada para o sistema integrado.
- No caso da situação climática seca, as demandas da irrigação apresentaram resultados diversos, com falhas em vários cenários, exceto para os perímetros Carpina e Várzea do Una.
- A confiabilidade do atendimento das demandas nos cenários da situação climática seca, para o caso dos perímetros Carpina e Várzea do Una, foi de 100%, evidenciando que uma diminuição nas vazões liberadas pelos reservatórios para atendimento de menores áreas irrigadas, acarreta aumento na confiabilidade da oferta hídrica.
- Os perímetros de irrigação Trapiá e Várzeas-Passira, na situação climática seca, são os que apresentam os maiores riscos de falhas no atendimento às demandas, com percentuais de 67% e 50%, respectivamente.
- Na situação climática seca o sistema apresenta alta resiliência, ou seja, boa capacidade de recuperação, com ressalvas para os pontos de demandas correspondentes aos perímetros Trapiá e Várzeas-Passira.
- Na situação climática seca, a vulnerabilidade nos pontos de demandas de irrigação sustentadas pelo reservatório Jucazinho chega a 41,64% (cenário C2), para o caso do Perímetro Várzeas-Passira, que é o de maior em área potencialmente irrigável (6.750 ha) e o de maior área cultivada otimizada.
- A aplicação do critério de sustentabilidade às demandas de irrigação, associado à receita líquida potencial anual da produção agrícola irrigada (outra inovadora contribuição deste estudo), permitiu definir o provável benefício financeiro de cada cenário, considerando que a atividade da agricultura irrigada está sujeita a riscos e incertezas hidrometeorológicas.

- Mesmo se tratando de situações hipotéticas, onde as vazões mensais para a irrigação foram consideradas pelos resultados ótimos obtidos pelo ORNAP, mantidos fixos volumes metas e outros parâmetros físicos do sistema, o uso do critério de sustentabilidade, hierarquizando os indicadores de desempenho, permite definir os melhores valores de prioridades para atender as demandas de irrigação, subsidiando políticas de preferências para a operação do sistema hídrico.

- ❖ Embora que abordagens determinísticas tenham sido idealizadas, imaginando-se o futuro como conhecido através de cenários de planejamento, o esquema de aplicação de estratégias operacionais otimizadas para uso no modelo de simulação atesta que os resultados alcançados são interessantes subsídios para o processo decisório, sendo obtidos com baixos custos computacionais.

Respeitando-se os limites quanto ao escopo e extensão intrínsecos à natureza do trabalho, acredita-se que a pesquisa cumpriu aos seus objetivos originais, sendo factível recomendar o que se apresenta a seguir.

- ❖ A evolução do uso e controle das disponibilidades e da oferta de água aos diversos usuários pode seguir a tendência atual (perdulária) ou ter uma performance mais desejável. Como as demandas do abastecimento foram consideradas fixas no presente estudo, incorporando perdas da ordem de 40%, razão da deficiência de operação e manutenção dos sistemas de abastecimento, recomenda-se para o futuro, além de incluir a demanda para dessedentação animal, testar o sistema hídrico para demandas variáveis, considerando até reduções das necessidades de água passíveis de advir de ações de natureza legal e administrativa, como o advento da outorga.

- ❖ Recomenda-se incorporar critérios mais consolidados para a definição de vazão ecológica para os reservatórios, visto sua importância na integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental.

- ❖ Futuras demandas de abastecimento de comunidades rurais situadas em áreas próximas aos reservatórios precisariam ser identificadas e avaliadas em novos prognósticos sobre o desempenho do sistema. Deve também ser considerado o requerimento para lixiviação de sais a ser incluído nas quantidades de água de irrigação.

- ❖ Na irrigação, fatores como a inadequação dos projetos, a baixa eficiência e a operação deficientes dos sistemas, provocam grandes perdas de água. Para outros estudos, recomenda-se testar o sistema hídrico para uma condição de melhoria na eficiência dos sistemas de

irrigação, dado que a melhoria do gerenciamento das demandas deve ser estimulada, sob pena dos agravamentos da escassez relativa de água e dos conflitos pelo seu uso na região.

❖ Caso a prática da irrigação intensiva venha se constituir numa decisão de futuro na área de influência dos reservatórios Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, preservando-se o uso da água para o abastecimento de populações, recomenda-se que medidas de proteção sanitária destes mananciais sejam adotadas, tal como a limpeza prévia da vegetação existente na bacia hidráulica, preservação de uma faixa de proteção permanente no entorno das represas, destacando-se a realização de trabalhos de conscientização do produtor rural e de controle de uso de agroquímicos nas terras próximas, buscando evitar o risco de poluição das águas.

❖ Em se tratando de um estudo de planejamento, em base mensal, variáveis aleatórias como vazões de cheias foram tratadas de forma simplificada, visando solucionar o problema de forma aproximada e computacionalmente eficiente. Novas simulações podem ser realizadas considerando uma série de vazões afluentes mais extensa, com a utilização de modelos estocásticos de geração de séries sintéticas, podendo ser acoplado resultados de estudos de cheia para o rio Capibaribe.

❖ No aspecto de qualidade da água, a falta de tratamento ou tratamento precário dos esgotos sanitários é a principal causa que vem impedindo ou restringindo o uso da água dos mananciais pelos usuários situados à jusante das fontes poluidoras. É desejável que haja expressivo avanço no controle dessas fontes, de sorte a reduzir os níveis de poluição a valores toleráveis, para racionalizar o uso, a recuperação e preservação da qualidade da água.

❖ A variabilidade temporal dos preços de mercado para o produto agrícola gerado e dos custos anuais de insumos não foram considerados neste trabalho, pelo o que se recomenda que sejam enfocados em pesquisas futuras.

❖ Por fim, é importante referenciar que os critérios de desempenho adotados não devem ser analisados de maneira isolada. Poder-se-ia cogitar, numa seqüência deste trabalho, o uso dos mesmos de forma conjunta com a análise multicriterial, levando-se em consideração fatores econômicos, sociais e ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - CPRH (2005). Bacias Hidrográficas - Resultados do Monitoramento das Bacias: Relatório da Bacia do Rio Capibaribe [<http://www.cprh.pe.gov.br/>].
- AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. (1999). Atlas Hidrológico do Brasil-Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos. [<http://www.aneel.gov.br/cgrh/atlas/girh>].
- ALBUQUERQUE, A. S. O., FARIAS, S. R. A., CURI, R. C., CURI, W. F. (2003). Avaliação do potencial de atendimento de uma área passível de irrigação de 10 000 ha pelo reservatório de Jataúba - PE. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba - PR.
- ALBUQUERQUE, A. S. O., ANDRADE, P. R. G. S., CURI, R. C., CURI, W. F. (2003). Uma análise da operação de um sistema de cinco reservatórios do alto Capibaribe, Pernambuco. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba - PR.
- ALMEIDA, M. A., CURI, R. C., CURI, W. F. (2001). Estimativa de variações no desempenho otimizado de um sistema hídrico para o semi-árido paraibano para diferentes cenários climáticos, fontes hídricas e de funções objetivo. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú - SE.
- ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F., CURI, R. C. (2001). Manejo de água de chuva sob a ótica da operação de múltiplos reservatórios para atendimento de demandas hídricas de bacias. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Captação de Água de Chuva no Semi-Árido. Campina Grande - PB.
- ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F., CURI, R. C. (2002a). ORNAP na Otimização da receita de três perímetros irrigados abastecidos por dois reservatórios conectados em série. Revista Engenharia Agrícola, v.22, n.1, p.22-32.
- ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F., CURI, R. C. (2002b). Uma contribuição ao estudo da operação conjunta ótima de reservatórios e áreas irrigáveis na escala de bacia hidrográfica. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Salvador-BA.
- ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F., CURI, R. C. (2002c). Alocação ótima de recursos de água associada à operação integrada de reservatórios de usos múltiplos: uma avaliação de alternativa para reforço do abastecimento de Recife. Anais do Seminário “Planejamento,

- Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas". João Pessoa - PB.
- APTIDÃO AGRÍCOLA DAS TERRAS DE PERNAMBUCO (1979). Secretaria Nacional de Planejamento Agrícola, Ministério da Agricultura. BINAGRI - Biblioteca Nacional de Agricultura, Brasília, DF. 98p.
- ACQUANET - Modelo para alocação de água em sistemas complexos de recursos hídricos - Manual do Usuário (2002). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária - Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (LabSid). São Paulo. 22p.
- AZEVEDO, L. G.T., PORTO, R. L., FILHO, K. Z. (1997). Modelos de simulação e de redes de fluxo, In: TÉCNICAS quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS: ABRH. p.164-237.
- AZEVEDO, L. G. T., GATES, T. K., FONTANE, D. G., LABADIE, J. W., PORTO, R. L. (2000). Integration of Water Quantify and Quality in Strategic River Basin Planning. Journal of Water Resources Planning and Management, 126 (2), p.85-97.
- BANCO DO NORDESTE S/A (2003). Manual de Orçamentos Agropecuários - CENOP-CDE, Campina Grande - PB. 234p.
- BANCO DO NORDESTE S / A (2003). Agenda do Produtor Rural 2003. 304p.
- BARBOSA, D. L., CURTI, R. C., CURTI, W. F. (2001). Um estudo de caso da operação integrada ótima de três reservatórios em paralelo com usos múltiplos. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú - SE.
- BARBOSA, P. S. (1997). O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros. A Água em Revista. CPRM, Brasil, Ano V (8).
- BARROS, M. T. L. (1997). A programação dinâmica aplicada à engenharia de recursos hídricos In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Editora da Universidade/UFRGS-ABRH. Porto Alegre, p.239-277.
- BARTH, F. T. (1987). Fundamentos para a gestão dos recursos hídricos. In: Modelos para o gerenciamento de recursos hídricos. NOBEL/ABRH (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1). São Paulo, p.1-91.
- BELLMAN, R. E., DREYFUS, S. E. (1962). Applied dynamic programming. Princeton: Princeton University.
- BOLLER, W., GAMERO, C.A. E PEREIRA, J.O. (1996). Avaliação de diferentes sistemas de preparo e de condições de cobertura do solo. XXV CONBEA, p. 160.

- BRAGA JR., B. P. F. (1987). Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: Modelos para o gerenciamento de recursos hídricos. NOBEL/ABRH (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1). São Paulo, p.427-518.
- BRAGA JR., B. P. F., GOBETTI, L. (2002). Análise Multiobjetivo. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. 2ª ed., Capítulo 7, Porto Alegre, RS, Brasil, Ed. UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- BRANDÃO, J. L. B. (2004). Modelo para operação de sistemas de reservatórios com múltiplos usos. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica de Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado, 160p.
- BRANS, J. P., MARESCHAL, B., VINCKE P. (1984). PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis. In: Brans, J. P. (ed), Operational Research 84, North-Holland, Amsterdam, 408-421.
- BRAVO, J. M., COLLISCHONN, W., PILAR, J. V. (2005). Otimização da operação de reservatórios: estado-da-arte. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa - PB.
- BUCHANAN, J. T., HENIG, E. J., HENIG, M. I. (1998). Objectivity and subjectivity in decision making process. Annals of Operational Research, 80, p.333-345.
- CARMICHAEL, W. W. (1996). Toxic Microcystis and the environment. In: Toxic Microcystis. CRC Press, Boca Raton, New York. p. 1-12.
- CASTRO, H. L., PORTO, R. L. L. (2003). Avaliação da disponibilidade hídrica para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo com o uso de um SSD sistema de suporte a decisões. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba - PR.
- CENTRO DE ABASTECIMENTO ALIMENTAR DE PERNAMBUCO – CEASA / PE (2003). Cotação Diária de Preços-Preços em Atacado / Preço médio real comercializado na CEASA - OS Recife. [<http://www.ceasape.org.br>].
- CELESTE, A. B., CURI, W. F., CURI, R. C. (2004). Otimização de modelagens de alternativas de esvaziamento de um sistema de reservatórios na bacia do rio Piancó. Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís - MA.
- CHENG, K-W., HSU, N-S. (2002). Network flow optimization model for basin-scale water supply planning. Journal of Water Resources Planning and Management. 128 (2), p.102-112.
- CIRILO, J. A. (1997). Programação não linear aplicada a recursos hídricos. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS - ABRH. Porto Alegre, p.305-359.

- CLEMMENS, A. J., BURT, C. M. (1997). Accuracy of irrigation efficiency estimates. *Journal of Irrigations and Drainage Engineering*, vol. 123, nº 6, p. 443-453.
- COHON, J. L., MARKS, D. H. (1975). A review and evaluation of multiobjective programming techniques. *Water Resources Research*, 11(2), p. 208-220.
- COMPANHIA INTEGRADA DE SERVIÇOS AGROPECUÁRIOS DE PERNAMBUCO – CISAGRO. 1991. Barragem do Carpina - Relatório da 2ª Etapa.
- COMPANHIA INTEGRADA DE SERVIÇOS AGROPECUÁRIOS DE PERNAMBUCO – CISAGRO. 1990. Barragem do Carpina - Relatório da 1ª Etapa. p.4.9.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. (1997). Projeto de análise de consistência de dados fluviométricos, Sub-Bacia 39 (Bacia do Rio Capibaribe) - Relatório Técnico. p.122.
- COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMPESA. (2004). Sistemas de Abastecimento de Água. Diretoria Técnica / Gerência de Produção - jornalzinho compesa, março 2004 [<http://www.compesa.com.br>].
- CORDEIRO, C. G. (1977). Caracterização dos problemas de sais dos solos irrigados no projeto de São Gonçalo-PB. Dissertação de Mestrado. UFPB/CCT, Campina Grande - PB. 180p.
- CORREIA, F. N., SANTOS, M. A., RODRIGUES, R. R. (1991). Reliability in Regional Drought Studies. NATO ASI Series, Water Res. Eng. Assest. Vol G29.
- COSTA, W. D., SANTOS, A. C., COSTA FILHO, W. D., FILHO, J. M., MONTEIRO A. B., SOUZA, F. J. A.(1998). Estudo hidrológico de Região Metropolitana do Recife - Projeto HIDROTEC – Convênio IDCR e UFPE/FADE. Recife- PE.
- CRAWLEY, P. D., DANDY, G. C. (1993). Optimal operation of multiple-reservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119 (1). P.1-17.
- CURI, W. F., CURI, R. C. e BATISTA, A. C. (1997). Alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arco Verde para irrigação via Programação Não-Linear. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória-ES.
- CURI, W. F., CURI, R. C. (1999). Modelo de otimização para operação de reservatórios (ORNAP). Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande - PB.
- CURI, R. C., CURI, W. F., BARBOSA, A. C. L. (2000). Uma avaliação quantitativa de impactos sócio-ambientais devido a irrigação. Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Fortaleza - CE.

- CURI, W. F., CURI, R. C. (2001). ORNAP: Optimal reservoir network analysis program. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú - SE.
- CURI, W. F., CURI, R. C. (2001). CISDERGO: Cropping and irrigation system design with reservoir and groundwater (optimal) operation. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú - SE.
- CURI, W.F., GOMES, H. P. (1996). Um dimensionamento ótimo para redes de distribuição de água para irrigação. III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH. p.171-177.
- DANTAS NETO, J., AZEVEDO, C. A. V., FRIZZONE, J. A. (1996). Uso de programação linear para estimar a demanda de água e o padrão de cultura no perímetro irrigado Nilo Coelho. XXV CONBEA p. 507.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS-DNOCS (1992). Estudo de Impacto Ambiental do Açude Público Jucazinho. Volume I. 321p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS-DNOCS (1992). Projeto Básico Barragem Jucazinho - Estudos Hidrológicos. 3ª DR.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. (1977). Crop Water Requirements, FAO- Rome-, Irrigation and Drainage Paper, N° 24.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. (1997). Necessidades hídricas das culturas. ESTUDOS FAO IRRIGAÇÃO E DRENAGEM N° 24. Versão em Português - Departamento de Engenharia Agrícola - CCT- Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande. 204p.
- DREYFUS, S. E., LAW, A. M. (1997). The art and theory of dynamic programming. New York: Academic Press.
- ELMAGHARABY, S. E. (1970). Some network models in management science. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. n° 29. Zürich. 176p.
- FENG, G. (2001). Strategies for sustainable water resources management in water scarce regions in developing countries. International Association of Hydrological Sciences (IAHS), Publ.272, p.107-112.
- FISCHBACK, P.E., SOMERHALDER, B.R. (1971). Efficiencies of and automated surface irrigation system with and without a runoff reuse system. Transactions of the ASAE, Vol. 14, n° 4, p.117-719.

- FLETCHER, S. G., PONNAMBALAM, K. (1998). A constrained state formulation for the stochastic control of multireservoir systems. *Water Resources Research*, 34(2), p.257-270.
- FRIZZONE, J. A. (1993). Funções de resposta das culturas à irrigação. ESALQ/USP (Série didática nº 0066), Piracicaba. 42p.
- FRIZZONE, J. A. (1995). Programação matemática aplicada a projetos hidroagrícolas. Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Viçosa - MG. p.29.
- FRIZZONE, J. A., SAAD, J. C. C. (1996). Modelo de programação não-linear para o dimensionamento e operação de sistemas de irrigação localizada, Anais do XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. p. 271.
- FULKERSON, D. R. (1961). An Out-of-Kilter Method for Minimal Cost Flow Problems. *Journal of the International Society of Applied Mathematics*, Vol. 9, nº 1.
- GANOULIS, J.G. (1994). *Engineering Risk Analysis of Water Pollution*. VCH Publishers Inc., New York, NY.
- GERSHON, M., DUCKSTEIN, L. (1993). Multiobjective approaches to river basin planning. *Journal of Water Planning and Management*, vol.109, p. 13-28.
- GLEICK, P. H., (1998). *The World's Water*. Island Press, Washington, DC. p.105-135. [Referência obtida via Internet: <http://www.worldwater.org/conflict.htm>].
- GOBBETTI, L. E. C., BARROS, M. T. L. (1993) Análise multiobjetivo aplicada ao planejamento de sistemas de recursos hídricos. Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Gramado, R.S. p 317-326.
- GOICOECHEA, A.; DUCKSTEIN, L. e FOGEL, L. L. (1979) - Multiple Objectives Under Uncertainty: An Illustrative Application of PROTRADE. *Water Resources Research*, 15(2), 203-210.
- GOICOECHEA, A., HANSEN, D. R., DUCKSTEIN, L. (1982). Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley & Sons, Inc. Canada. 519p.
- GOMES, H. P. (1999). Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento. Editora Universitária da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 3a. edição, 412 p.
- GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. (1998). Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco - PERH-PE. Documento Síntese. 223 p.

- GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO (1997). Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica – PQA/PE..Relatório N.º 7 / Tomo I. 256 p.
- GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO (2001). Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Capibaribe - Relatório Parcial N.º 03 (Águas Superficiais). Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco - SRH/PE.
- 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*, 22(7), p.1083-1094.
- GREGORY, J. W., FOURER, R. (2005). Nonlinear programming: frequently asked questions.[comunicação via Internet: <http://www-unix.mcs.anl.gov/otc/Guide/faq/>].
- HALL, W. B., DRACUP, J. (1970). *Water resources system engineering*. New York. McGraw-Hill. 372 p.
- HASHIMOTO, T., STEDINGER, J., LOUCKS, D. P. (1982). Reliability, Resilience and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. *Water Resources Research* 18(1), p.14-26.
- HENNIG, M. I., BUCHANAN, J. T. (1996). Solving MCDM problems: Process concepts. *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, 5, p.3-12
- HOUCK, M.H., COHON, J. L. (1978). Sequential explicitly stochastic linear programming models: a proposed method for design and management of multipurpose reservoir system. *Water Resource Research*. 14(2), p.161-169.
- JOCHIMSEN, E. M., CARMICHAEL, W. W., CARDO, D. M., COOKSON, S. T., HOLMES, C. E. M., ANTUNES, M. B. DE C., FILHO, D. A. DE M., LYRA, BARRETO, V. S. T., AZEVEDO, S. M. F. O., JARVIS, W. R. (1998). Liver failure and death after exposure to microcystins at a haemodialysis center in Brazil. *New Engl. J. Med.* 338 (13), p.873-878.
- JUNIOR, W. P. V., LANNA, A. E. L. (2002). Simulação e otimização da operação de um sistema de reservatórios: bacia do rio Curu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.07, n. 3, p.63-83.
- KJELDSEN, T. R., ROSBJERG, D. (2001). A framework for assessing the sustainability of a water resources system. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS)*, Publ. no.268, p. 107-113.
- LABADIE, J.W. (1987). Otimização da operação de projetos hidroagrícolas. Ministério da Irrigação - PROINE, Brasília, 249 p.

- LABADIE, J.W. (1988). Program MODSIM: River Basin Network Flow Model for the Microcomputer. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Co.
- LABADIE, J. W., AZEVEDO, L. G. T., PORTO, R. L. L. (1999). Programa MODSIM: Modelo de Rede de Fluxo para Simulação de Bacias Hidrográficas - Manual do Usuário e Estudos de Casos. LabSid - EP - USP. [disponível via Internet em: <http://www.phd.poli.usp.br/labsid>].
- LABADIE, J. W. (1998). Reservoir System Optimization Models. In: Decision Support Systems Applied to Water Resources Engineering, São Paulo.
- LABADIE, J. W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol 130(2), p.93-111.
- LANNA, A. E. L. (1982). Operação estratégica de reservatórios para suprimento hídrico e controle de cheias. Porto Alegre, IPH/UFRS, 124 p.
- LANNA, A. E. L. (1997). Introdução. In: TÉCNICAS quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre. Editora da Universidade / UFRGS – ABRH, p.15-41.
- LARAQUE, A. 1989. Estudo e previsão da qualidade da água de açudes do Nordeste semi-árido brasileiro. Recife, SUDENE/DPG/PRN (Hidrologia, 26). p.29.
- LEVANTAMENTO EXPLORATÓRIO - RECONHECIMENTO DE SOLOS DE PERNAMBUCO - Volume I. 1973. Divisão de Pesquisa Pedológica - DNPEA, Ministério da Agricultura, Recife. 359p.
- LIMA, C. A. G. (2004). Análise e sugestões para diretrizes de uso das disponibilidades hídricas superficiais da bacia hidrográfica do rio Piancó, situada no estado da Paraíba. Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Tese de Doutorado, 274p.
- LIMA, G., MAUAD, F. F., SALLA, M. R. (2003). Índices de sustentabilidade para o planejamento estratégico de sistemas hídricos. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba - PR.
- LIMA, H. V. C., LANNA, A. E. L. (2005). Modelos para operação de sistemas de reservatórios: atualização do estado da arte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.10, n. 3, p.5-22.
- LOUCKS, D. P. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, v. 42, n. 4, p.513-530.
- LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R., HAITH, D. A. (1981). Water resource systems planning and analysis. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

- LOUKS, D. P., STAKHIV, E. Z., MARTIN, L. R. (2000). Editorial: Sustainable water resources management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 126 (2), p.43-47.
- LUND, J. R., FERREIRA, I. (1996). Operating rule optimization for Missouri river reservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 122 (4), p.287-295.
- LUND, J. R., GUZMAN, J. (1999). Derived operating rules for reservoirs in series or in parallel. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 125 (3), p.143-153.
- MAFFEI, E., FERREIRA IRMÃO, J., SOUZA, H. R. (1986). Irrigação e Emprego no Sertão do São Francisco. Projeto OIT/ PNUD/ SUDENE.
- MAGALHÃES Jr. A. P. (1997). Gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil. A ÁGUA EM REVISTA, Ano V – nº 9, Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM. p.14-20.
- MAASS, A. et al. (1962). Design of water resource systems. Cambridge:Harvard University.
- MATHESON, S., LENCE, B., FÜRST, J. (1997). Distributive Fairness Considerations in Sustainable Project Selection. *Hydrological Sciences Journal*, v. 42, n. 4, p.531-548.
- MAUAD, F. F. (2000). Planejamento Integrado de Recursos Hidroenergéticos: O conflito de usos Múltiplos da Água no Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva em Portugal. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Tese de Doutorado, 182p.
- MALTA, V. F., DAMÁZIO, J. M., AZEVEDO, J. P. S. (2004). A utilização de métodos multicriteriais para a análise do conflito do sistema Lima Campos/Orós. *Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, São Luís - MA.
- MAYS, L.W., TUNG, Y.K. (1996). Systems Analysis. In: *Water Resources Handbook*, L.W. Mays (Editor).
- MANZER, D. F., BARNETT, M. P. (1962). Analysis by simulation programming technique for a high-speed digital computer. In: *Design of water-resources systems*, Cambridge, Harvard University Press, p.324-379.
- MEDEIROS, L. P. A., MONTENEGRO, S. (2001). Oferta e demanda de água para abastecimento da RMR. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*. Aracajú - SE.
- MELO, D. M., CURI, R. C., CURI, W. F., LIMA, C. A. G. (2004). Avaliação dos efeitos de variação das condições iniciais no processo otimizador do reservatório de Saco de Nova Olinda - PB. *Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, São Luís - MA.

- MELLO JR., A.V. E BRAGA JR., B.P.F. (1996). Análise multiobjetivo aplicada a um sistema de produção agrícola. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol 1, no. 1, p.11-27.
- MERRIAN, J. L., KELLER, J. (1978). *Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management*. Agricultural and Irrigation Engineering Department. Utah State University, Logan, Utah.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA (1973). *Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco, Volume I. Divisão de Pesquisa Pedológica – DNPEA*. Recife. 359p.
- MOLLE, F., CADIER, E. (1992). *Manual do Pequeno Açude*. SUDENE - DPG - PRN - DPP - APR. 523p.
- MOSTERT, E. (1998). A framework for conflict resolution. *Internacional Water Resources Association – Water Internacional*, New York. Vol. 23, n.º 4, p.206-215.
- NEMHAUSER, G. L. (1966). *Introduction to dynamic programming*. New York: John Wiley.
- OLIVEIRA, J. A., LANNA, A. E. L. (1997). Otimização de um sistema de múltiplos reservatórios atendendo a múltiplos usos no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, Vol. 2, n.2. p.123-141.
- ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS – OEA., (1996). *Desarrollo Sostenible de Regiones Multinacionales: Documento Técnico*. In: *Conferencia Cumbre Sobre Desarrollo Sostenible*, Santa Cruz de La Sierra, Bolivia, el 7 y 8 diciembre. [comunicação via Internet: <http://www.oas.org/sp/prog/bolivia/regmulth>].
- OVERTON, D. E., MEADOWS, M. E. (1976). *Introduction and modeling concepts*. In: *Stormwater modeling*. New York, Academic Press, Inc. 355 p.
- PAFFORD JR., R. J. (1957). *Operation of Missouri river main-stem reservoirs*. American Society of Civil Engineers - ASCE, paper 2984, p.381-394.
- PAIXÃO, M. P., STUDART, T. M. C., CAMPOS, J. N. B., CARVALHO, R. M. (2003). *Aplicação de indicadores de performance na avaliação de sistemas hídricos: um estudo de caso*. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba - PR.
- PEARCE, D.W., MARKANDYA, A. (1989). *Environmental policy benefits: monetary valuation*. Paris: OECD. 71 p.
- PENG, C. S., BURAS, N. (2000). Practical estimation of inflows into multireservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 125 (5), p.331-334.
- 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*. Dissertação

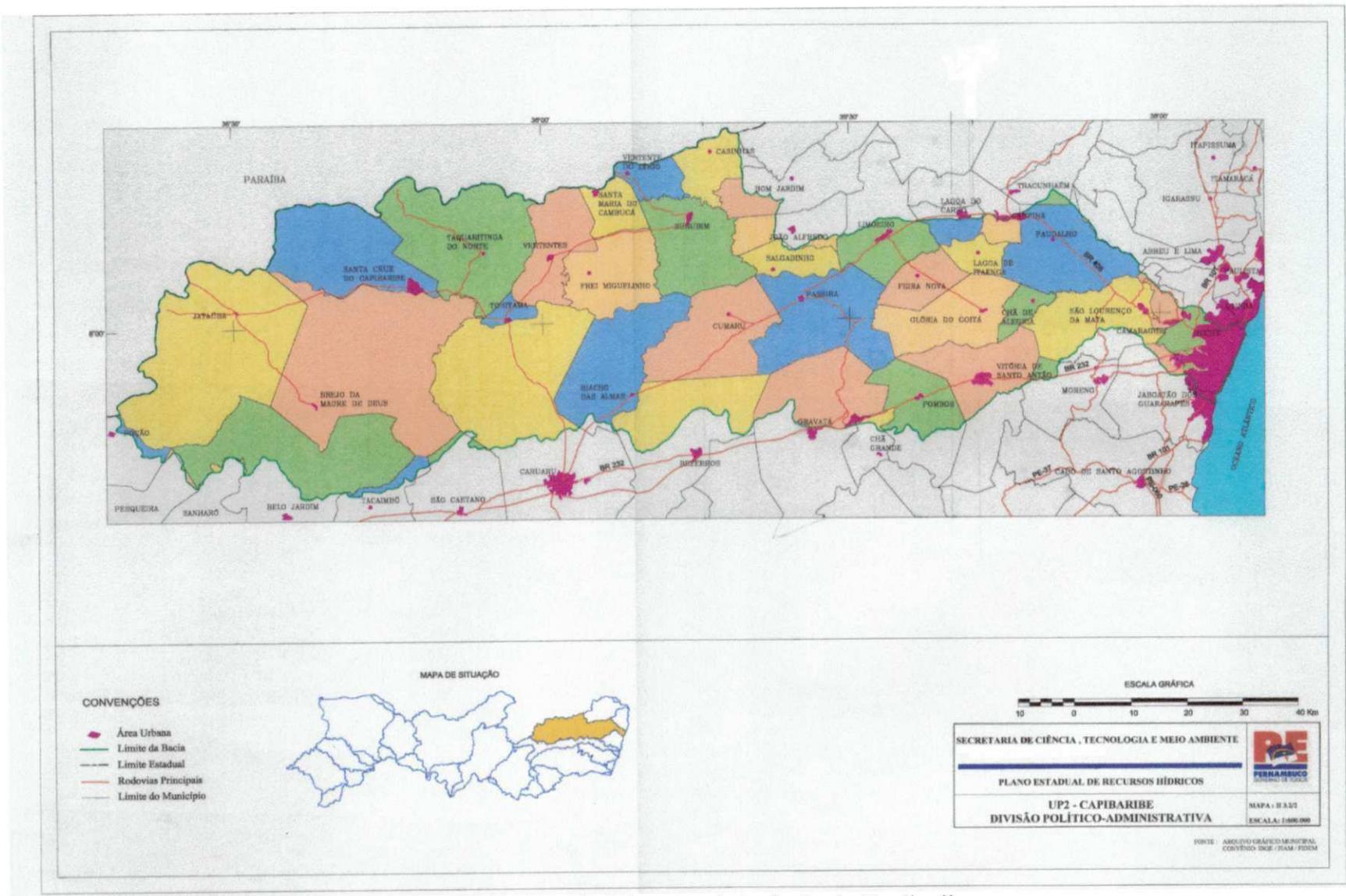
- de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – EESC/USP.
- PERERA, B. J. C., CODNER, G. P. (1996). Reservoir targets for urban water supply systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 122 (4), p.270-279.
- PEREIRA, P. P. 1976. Recife - Controle das inundações. SANEAMENTO - Revista Técnica e Informativa do DNOS. Rio de Janeiro, Vol.50, nº 03. p170-177.
- PORTO, R. L. L., AZEVEDO, L. G. T. (1997). Sistemas de suporte a decisões aplicadas a problemas de recursos hídricos. In: *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Editora da Universidade / UFRGS - ABRH. Porto Alegre. p.43-95.
- PORTO, R. L. L., LABSID, GOVERNO DA BAHIA/SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS (2004). Sistema de suporte a decisões para gerenciamento dos recursos hídricos das bacias dos rios Itapicuru e Paraguaçu–Relatório Técnico Final. 109p.
- QUINTELA, A. C. (1981). Hidráulica. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. p.310-313.
- REIS, A. C. S., LIMA, D. A. (1970). Contribuições ao estudo do clima de Pernambuco: Recursos Vegetais de Pernambuco. Série I, Agricultura, Caderno do Conselho de Desenvolvimento de Pernambuco. Recife.
- RIBEIRO, M. M. R. (1990). Operação de um sistema de reservatórios para usos de conservação. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil.
- ROBERTO, A. N., PORTO, R. L. L. (1999a). Alocação da água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte - MG.
- ROBERTO, A.N. e PORTO, R.L. L. (1999b). MODSIMP32: Manual do Usuário, Interface para o Modelo MODSIM. Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. [<http://www.phd.poli.usp.br/software>].
- ROS, D. A., BARROS, M. T. L. (2003). Otimização da operação de sistemas hidroenergéticos: impactos de diferentes objetivos. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Curitiba - PR.
- ROY, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples (la Methode ELECTRE). *Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle*. 6(8), p.57-75.
- SALATI, E., LEMOS, H. M., SALATI, E. (1999). Água e o desenvolvimento sustentável. In: *Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. Escrituras Editora. São Paulo. p.39-62.

- SANTOS, R. B., CURI, W. F., CURI R. C. (2004). Aplicação do método multicriterial PROMETHEE para ampliação da oferta hídrica na bacia do rio Gramame - PB. Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís - MA.
- SAATY, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 15, p.234-281.
- SIMONOVIC, S. P. (2001). Measures of sustainability and their utilization in practical water management planning. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS)*, Publ.268, p.3-16.
- SIMONOVIC, S. P. (1992). Reservoir system analysis: closing gap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 118 (3), p.262-280.
- SILVA, C. A. B., CURI, R. C., CURI, W. F., LIMA, C. A. G. (2004). Estudo da otimização do uso dos recursos hídricos do açude Santa Inês na bacia do rio Piancó. Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís - MA.
- SILVA, T. C., SILANS, A. P., FILHO, L. A. P., PAIVA, A. E. D. B., BILLIB, M., BOOCHS, P. (2002). Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento de Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.07, n. 1, p.81-102.
- SILVA, S. R., WANDERLEY, S. F. S. (2003). Ações pertinentes à cobrança pelo uso da água em Pernambuco. [comunicação via Internet: <http://www.sectma.pe.gov.br/artigos>].
- SILVA, W. P. (1999). Software Ajuste de Curvas. Departamento de Física, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.
- SÓLON, A. B., CAMPOS, J. N. B, STUART, T. M. C. (2001). Estimativas dos valores esperados para durações máximas de secas hidrológicas no açude Castanhão - CE. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú - SE.
- SRINIVASAN, K., NEELAKANTAN, T. R., NARAYAN, P. S., NAGARAJUKUMAR, C. (1999). Mixed-Integer programming model for reservoir performance optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 125 (5), p. 298-301.
- STRASKRABA, M., TUNDISI, J. G., DUNCAN, A. (1993). State-of-art of reservoir limnology and water quality management - Comparative reservoir limnology and water quality management. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, p. 213-288.
- SUN, Y-H., YEH, W., HSU, N-S., LOUIE, P. (1995). Generalized network algorithm for water-supply system optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 121 (5), p.392-398.

- TAKEUCHI, K., KUNDZEWICZ, Z. W. (1998). Sustainability and reservoirs. Sustainable Reservoir Development and Management. Publication of International Association of Hydrological Sciences - IAHS, Wallingford, UK, N° 251, p.31-62.
- TEJADA-GUIBERT, J., STEDINGER, J., STASCHUS, K. (1990). Optimizacion of the value of CVP's hydropwer production. Journal of Water Resources Planning and Management. 118 (3), p.262-280.
- TELLES, D. D. (1999). Água na agricultura e pecuária. In: Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. Escrituras Editora. São Paulo. p.305-336.
- TU, M., HSU, N., YEH, W. (2003). Optimization of reservoir management and operation with hedging rules. Journal of Water Resources Planning and Management. 129(2), p.86-97.
- TUCCI, C. E. M. (1987). Modelos determinísticos. In: MODELOS para o gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: NOBEL/ABRH. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1), p.213-323.
- TUNDISI, J. G., TUNDISI, T. M., (1992). Eutrofication of lakes and reservoirs: a comparative analysis, case studies, perspectives. In: Algae and Environment - A General Approach. Sociedade Brasileira de Ficologia, São Paulo, p.1-33.
- UNESCO/WMO (1992). Internacional Glossary of Hydrology (2nd. edn.). UNESCO/WMO.
- UNESCO, (1997). Evaluación Global de Los Recursos Mundiales de Agua Doce: Artículo Especial. Waterway, Boletín IHP, n.11, jul/set. [comunicação via Internet: http://www.unesco.org.uy/phi/watercsp/wa11_astesp].
- VERAS, B. (1998). Projeto São Francisco: A integração das águas do semi-árido. Editora do Senado Federal, Brasília - DF, 63p.
- VIEIRA, L. A. A., VIEIRA V. P. P. B. C. (1995). Recursos hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido Nordeste. Anais do XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e II Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. Vol. 2: Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos. Recife - PE.
- VINCKE, Ph. (1992). Multicriteria Decision-Aid. John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane. Chichester e New York. 154p.
- VOTUBRA, L. (1988). Analysis of water resources systems. Amsterdam: Elsevier.
- WAGNER, H. M. (1969). Principles of operations research. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- WCED - World Commission on Environment and Development. (1987). Our common future ("The Brundtland report"). Oxford University Press, Oxford, U. K.

- WILLARDSON, L. S. (1978). Attainable Irrigation Efficiencies. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 98, nº IR 2, p.239-246.
- WURBS, R. A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 119 (4), p.455-472.
- WURBS, R. A. (2005). Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models. Department of Civil Engineering - Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. TR-282, 199p.
- YEH, W. W. G., (1985). Reservoir management and operations models: a state – of – the - art review. *Water Resources Research, Washington*. Vol. 21, nº 12, p.1797-1818.
- ZELNY, M. (1982). *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill Book Company. New York. 563p.
- ZUFFO, A. C. (1998). Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos. Tese apresentada à EESC - USP para obtenção de Título de Doutor em Engenharia Civil. São Carlos - SP.

ANEXO 1- Divisão político-administrativa da bacia do rio Capibaribe



Divisão político-administrativa da bacia do rio Capibaribe.

**ANEXO 2 – Estimativa da população urbana na área de influência dos
reservatórios no ano de 2000**

Estimativa da população urbana na área de influência dos reservatórios.

Reservatório	Localidade	População urbana (hab)
		Ano 2000
1) Jucazinho	Bezerros	44.566
	Caruaru	217.407
	Casinhas *	1.425
	Cumaru *	6.798
	Frei Miguelinho *	2.364
	Gravatá	55.363
	Passira *	12.326
	Riacho das Almas *	6.123
	Salgadinho *	2.251
	Limoeiro *	42.412
	Santa Maria do Cambucá *	2.261
	Surubim *	33.145
	Taquaritinga do Norte *	12.022
	Toritama *	20.127
	Vertente do Lério *	1.508
	Vertentes *	6.303
	Santa Cecília / PB	1.193
	Cajazeira #	474
	Couro Dantas #	581
	Rangel #	710
	Trapiá #	905
	Capivara #	272
	Tambor #	1.114
Cheus #	576	
Total 1	472.226	
2) Carpina	Carpina *	61.006
	Lagoa do Carro *	8.087
	Lagoa de Itaenga *	15.345
	Feira Nova *	12.156
	Paudalho *	34.432
	Total 2	131.026
3) Goitá	Glória do Goitá *	12.542
	Chã de Alegria *	8.082
	Total 3	20.624
4) Várzea do Una	São Lourenço da Mata *	83.543
	Camaragibe *	128.702
	Total 4	212.245
5) Tapacurá	População de Recife *, Jaboatão dos Guararapes *.	
	Total 5	1.991.379
População Urbana Total (1+2+3+4+5)		2.827.500

Fonte : IBGE/DPE/Dep. de População e Indicadores Sociais. Ger. de Estudos e Análises da Dinâmica Demográfica (Tendência: CENSOS 1991- 2000).

* Sede municipal localizada na bacia; # Povoado rural (população projetada conforme dados do DNOCS, 1997).

**ANEXO 3 – Vazões afluentes para os reservatórios Jucazinho, Carpina,
Tapacurá, Goitá e Várzea do Una**

Vazões afluentes para o reservatório Jucazinho (vazão média mensal - m³/s)

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1957	0,046	0,011	4,024	4,059	0,171	0,000	0,058	0,000	0,064	0,021	0,051	0,034
1958	0,073	0,065	0,064	0,058	1,327	0,096	1,038	0,155	0,147	0,033	0,058	0,037
1959	0,062	0,069	2,665	0,200	0,155	2,831	1,339	0,124	0,066	0,098	0,085	0,027
1960	0,020	0,027	96,998	27,111	9,503	7,616	5,832	3,772	2,570	0,049	0,038	0,017
1961	4,794	0,910	12,502	14,087	7,099	0,319	3,535	0,042	0,040	0,017	0,016	0,011
1962	0,018	0,011	0,145	0,093	0,031	1,620	13,253	0,047	0,015	0,035	0,022	0,004
1963	0,012	0,004	0,026	0,053	0,028	0,013	0,022	0,007	0,012	0,009	0,009	0,006
1964	0,631	0,520	29,986	7,287	11,079	15,096	6,877	4,263	0,665	0,007	0,006	35,850
1965	0,002	0,002	0,003	4,756	0,690	16,610	0,478	0,118	0,010	0,057	0,004	0,005
1966	0,003	0,011	0,002	22,375	8,955	59,864	68,205	19,480	1,443	0,009	0,006	0,003
1967	0,124	0,055	17,187	80,153	18,656	4,128	7,047	0,618	0,388	0,618	0,405	0,618
1968	1,055	0,211	2,791	1,642	3,710	1,090	1,229	0,652	0,346	0,278	0,151	0,316
1969	0,523	0,298	38,351	14,104	1,874	11,233	33,090	5,553	1,306	0,299	0,130	0,109
1970	0,458	0,440	1,557	0,960	0,541	0,905	19,147	7,474	0,596	0,509	0,272	0,248
1971	0,045	0,096	0,140	16,835	1,400	2,110	1,073	2,012	0,209	0,322	0,131	0,000
1972	0,012	0,432	10,300	0,865	0,960	3,925	1,286	0,879	0,939	0,039	0,023	0,006
1973	0,152	0,188	5,532	8,986	3,274	1,162	1,303	0,460	0,231	0,012	0,008	0,109
1974	1,326	25,734	22,861	87,724	13,126	8,833	16,711	3,522	1,564	0,501	0,069	0,084
1975	0,486	0,776	1,810	1,828	4,559	0,764	59,480	2,899	2,142	1,396	1,226	0,829
1976	0,024	3,683	1,387	3,326	2,106	0,787	0,546	0,367	0,112	0,625	0,073	0,228
1977	0,327	0,094	0,549	24,740	91,811	27,894	57,517	9,311	6,716	2,248	0,026	0,036
1978	0,433	0,732	41,352	5,976	23,938	6,912	17,031	8,264	2,039	2,144	0,641	0,692
1979	0,168	0,237	0,551	0,114	0,267	0,123	0,505	0,071	0,051	0,582	0,202	0,230
1980	0,000	0,003	1,146	0,000	0,002	1,797	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1981	0,525	0,004	110,577	31,478	2,294	1,239	0,861	0,744	0,791	0,000	0,000	0,000
1982	0,433	0,802	0,811	4,940	4,315	7,620	1,451	0,779	0,170	0,616	0,674	0,737
1983	0,066	0,771	0,618	0,020	0,026	0,023	0,011	0,024	0,000	0,084	0,014	0,057
1984	0,026	0,000	6,594	38,277	16,269	3,886	15,164	2,325	4,974	0,009	0,001	0,001
1985	0,000	28,096	40,984	150,935	23,212	5,437	7,736	5,703	0,937	0,016	0,000	0,000
1986	0,010	1,282	17,330	31,966	16,748	8,542	13,154	9,768	2,261	0,343	0,044	0,010
1987	0,057	0,162	3,589	5,382	0,707	1,180	2,426	0,367	0,045	0,725	0,142	0,112
1988	0,000	0,000	10,604	13,196	6,074	1,293	14,134	2,017	0,299	0,000	0,000	0,000
1989	0,000	0,000	21,489	15,471	15,783	8,054	18,167	2,875	0,726	0,030	0,000	0,000
1990	0,370	0,000	0,000	0,000	0,000	0,809	4,952	1,343	0,230	0,047	0,000	1,800
1991	0,000	0,000	5,021	2,382	4,978	0,714	0,635	1,111	0,333	0,055	0,000	0,000
1992	2,504	5,570	4,271	45,278	1,023	0,741	2,245	0,848	2,154	0,037	0,000	0,000
Média	0,411	1,980	14,273	18,518	8,241	5,980	11,043	2,722	0,961	0,330	0,126	1,173

Vazões afluentes para o reservatório Carpina (vazão média mensal - m³/s)

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1957	0,053	0,049	0,000	0,730	0,061	0,000	0,048	0,000	0,039	0,029	0,016	0,031
1958	0,022	0,011	0,020	0,040	1,528	0,065	0,000	0,146	0,057	0,037	0,029	0,037
1959	0,025	0,041	1,937	0,230	0,162	1,494	1,350	0,106	0,068	0,062	0,076	0,043
1960	0,025	0,017	28,238	12,012	4,071	2,884	3,756	3,836	1,509	0,061	0,056	0,035
1961	3,096	0,810	2,883	11,320	3,893	0,000	2,069	0,031	0,028	0,015	0,004	0,008
1962	0,004	0,006	0,076	0,047	0,024	1,439	8,519	0,049	0,015	0,034	0,021	0,016
1963	0,004	0,005	0,013	0,041	0,016	0,010	0,030	0,013	0,006	0,012	0,005	0,003
1964	0,000	0,078	13,245	1,712	4,420	4,438	0,683	1,070	0,000	0,017	0,003	0,618
1965	0,002	0,001	0,002	0,547	0,398	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,007	0,002
1966	0,001	0,000	0,002	0,000	1,756	21,672	42,220	9,112	0,000	0,005	0,002	0,001
1967	0,000	0,000	2,637	18,499	2,250	2,478	2,564	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1968	0,000	0,000	0,593	0,362	0,261	0,211	0,119	0,067	0,080	0,000	0,000	0,000
1969	0,304	0,100	2,878	3,308	1,338	8,087	15,534	3,164	0,413	0,246	0,019	0,070
1970	0,049	0,129	0,205	0,287	0,186	0,503	10,999	7,096	0,334	0,236	0,052	0,074
1971	0,063	0,019	0,000	0,678	0,000	0,577	0,185	0,615	0,000	0,087	0,033	0,132
1972	0,018	0,000	0,225	0,000	0,242	1,394	0,000	0,000	0,000	0,031	0,031	0,022
1973	0,107	0,145	0,000	3,845	2,233	0,876	1,061	0,347	0,209	0,010	0,010	0,036
1974	0,000	0,000	0,000	11,135	3,049	3,258	8,489	1,343	1,168	0,122	0,068	0,065
1975	0,385	0,192	0,281	0,114	0,270	0,000	23,192	2,110	0,460	0,146	0,151	0,480
1976	0,012	0,073	0,075	0,686	1,162	0,047	0,000	0,000	0,000	0,311	0,108	0,118
1977	0,000	0,000	0,418	0,264	14,255	12,120	29,209	5,928	3,530	1,247	0,012	0,029
1978	0,806	0,538	2,302	1,927	7,384	3,812	11,827	6,695	1,607	1,612	0,969	0,696
1979	0,091	0,185	0,000	0,021	0,000	0,012	0,361	0,000	0,000	0,774	0,256	0,217
1980	0,000	0,001	1,044	0,000	0,002	1,520	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1981	0,000	0,000	5,477	4,850	2,366	1,508	1,280	0,495	0,414	0,000	0,000	0,000
1982	0,591	0,525	0,793	2,770	2,161	6,383	1,623	0,683	0,166	0,567	0,468	0,617
1983	0,036	0,329	0,614	0,006	0,022	0,014	0,014	0,014	0,001	0,053	0,078	0,032
1984	0,033	0,000	1,343	8,344	7,710	1,832	9,934	1,308	2,726	0,008	0,001	0,001
1985	0,000	0,000	10,068	10,945	5,071	3,657	6,777	2,971	1,031	0,008	0,000	0,000
1986	0,073	0,197	2,085	8,374	3,040	8,201	11,997	7,558	1,477	0,212	0,044	0,009
1987	0,024	0,000	0,000	3,608	0,232	0,076	1,725	0,285	0,043	0,537	0,074	0,178
1988	0,000	0,000	2,495	5,372	5,148	1,210	10,275	1,852	0,426	0,000	0,000	0,000
1989	0,000	0,000	0,000	4,915	4,940	2,285	10,764	0,976	0,676	0,018	0,000	0,000
1990	0,496	0,000	0,000	0,000	0,000	0,593	4,816	1,784	0,209	0,042	0,000	0,431
1991	0,000	0,000	0,056	0,670	4,012	0,703	0,872	1,039	0,264	0,044	0,000	0,000
1992	0,057	2,400	1,956	5,353	0,254	0,197	1,313	0,316	0,971	0,049	0,000	0,000
Média	0,177	0,163	2,277	3,417	2,331	2,599	6,206	1,695	0,498	0,184	0,072	0,111

Vazões afluentes para o reservatório Tapacurá (vazão média mensal - m³/s)

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1968	0,940	0,970	2,430	0,910	1,810	0,680	1,860	0,830	0,630	0,690	0,750	0,960
1969	0,530	0,800	5,390	0,730	5,610	11,090	20,370	1,680	0,600	0,470	0,310	0,370
1970	0,370	0,410	0,740	1,050	0,700	2,910	19,500	11,250	0,690	0,620	0,440	0,270
1971	0,260	0,330	0,590	0,530	1,600	1,050	2,150	1,140	0,540	0,310	0,280	0,190
1972	0,200	0,160	0,240	1,430	2,410	9,080	2,270	1,860	0,650	0,250	0,290	0,160
1973	0,520	0,210	0,560	3,540	1,250	2,820	2,200	0,430	0,430	0,240	0,150	0,450
1974	0,220	0,280	1,650	15,170	3,480	3,670	0,310	11,410	0,320	0,150	0,220	0,260
1975	0,598	0,114	2,311	2,069	2,545	2,694	9,295	2,859	2,214	1,006	1,290	4,249
1976	0,730	1,820	7,020	3,013	2,722	2,736	1,816	0,572	0,531	4,258	0,429	2,418
1977	0,558	3,050	1,341	8,578	7,088	11,451	12,900	2,441	3,786	2,123	1,971	1,715
1978	1,541	6,309	3,980	4,306	5,293	8,562	8,488	6,995	6,595	1,481	1,376	2,177
1979	2,961	4,686	3,816	1,196	6,143	8,251	6,263	2,862	4,005	1,289	1,197	1,041
1980	0,936	8,728	6,502	4,597	5,708	15,347	1,980	2,994	2,148	2,135	1,735	1,509
1981	1,789	1,449	11,970	2,461	3,846	5,795	4,430	1,597	1,483	1,290	1,198	5,407
1982	1,830	3,934	2,122	2,462	7,920	13,347	4,837	3,968	2,580	1,645	1,528	2,715
1983	1,415	3,077	8,831	1,122	5,550	2,585	2,252	4,405	0,977	3,518	0,789	0,687
1984	2,592	0,593	0,925	8,993	13,384	5,284	9,736	8,832	4,698	2,179	1,954	1,700
1985	0,770	2,610	10,450	10,500	11,480	10,820	15,800	10,930	1,510	0,450	1,080	1,160
1986	0,540	1,990	3,640	15,920	4,890	22,290	25,390	6,380	2,450	1,750	2,660	3,080
1987	1,350	3,160	3,640	6,480	0,720	6,250	5,390	1,300	0,560	0,470	0,040	0,030
1988	1,420	0,420	4,710	4,190	9,570	8,150	35,420	3,150	1,520	0,490	0,770	0,700
1989	0,080	0,080	0,390	4,990	11,570	13,020	26,700	4,010	1,530	0,610	0,770	1,780
Média	1,007	2,054	3,784	4,738	5,240	7,631	9,971	4,177	1,839	1,247	0,965	1,501

Vazões afluentes para o reservatório Goitá (vazão média mensal - m³/s)

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1968	2,070	1,060	1,970	1,110	2,000	1,170	2,450	7,350	0,520	0,190	0,110	0,810
1969	0,180	0,110	0,990	0,990	7,100	12,560	12,770	2,530	0,970	0,600	0,480	0,330
1970	0,400	0,470	1,950	4,940	1,510	6,420	16,400	10,350	1,910	1,230	1,020	0,820
1971	0,900	0,970	1,040	1,450	4,750	4,430	4,770	3,740	2,050	1,260	0,960	0,590
1972	0,790	0,640	1,050	2,890	4,870	10,610	5,950	3,470	3,070	1,230	0,840	0,650
1973	0,990	0,700	0,840	7,380	2,910	12,340	6,880	2,290	2,650	1,140	1,730	0,970
1974	1,170	1,680	5,030	7,300	10,850	7,150	9,600	2,210	2,590	1,120	0,770	1,060
1975	0,877	0,156	2,371	2,301	2,813	3,125	10,913	3,063	2,537	1,206	1,404	4,715
1976	0,875	2,175	7,921	3,712	3,066	3,160	2,096	0,635	0,590	4,800	0,477	2,498
1977	0,513	3,264	1,368	9,225	7,623	12,384	14,127	2,553	4,270	2,279	2,116	1,877
1978	1,654	6,676	4,188	4,937	5,817	8,987	9,005	7,191	7,384	1,486	1,380	2,334
1979	3,260	5,256	4,281	1,260	6,999	9,445	7,158	3,232	4,560	1,428	1,326	1,153
1980	1,037	10,052	7,484	5,284	6,573	17,726	2,266	3,442	2,465	2,452	1,991	1,732
1981	2,056	1,664	13,837	2,838	4,441	6,696	5,118	1,841	1,710	1,487	1,381	6,251
1982	2,113	4,548	2,452	2,845	9,160	15,437	5,594	4,589	2,984	1,902	1,766	3,140
1983	1,636	3,558	10,215	1,298	6,419	2,990	2,605	5,095	1,130	4,069	0,913	0,794
1984	2,998	0,686	1,069	10,403	15,482	6,113	11,262	10,217	5,434	2,521	2,281	1,966
1985	0,200	1,750	10,800	9,200	5,430	4,870	11,000	4,840	1,340	0,670	0,530	0,550
1986	0,370	1,790	2,910	10,500	3,530	26,900	15,300	6,150	2,780	1,710	1,930	3,090
1987	1,170	1,410	2,480	4,770	1,200	2,340	3,380	1,440	1,030	0,800	0,520	0,490
1988	0,510	0,360	0,520	1,130	5,780	4,150	22,500	2,950	1,300	0,880	0,810	0,690
1989	0,690	0,640	0,750	5,500	5,060	7,860	13,000	5,340	3,110	1,690	1,570	1,830
Média	1,203	2,255	3,887	4,594	5,608	8,494	8,825	4,296	2,563	1,634	1,195	1,743

Vazões afluentes para o reservatório Várzea do Una (vazão média mensal - m³/s)

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1968	1,240	0,450	1,350	0,860	0,790	0,550	1,100	0,580	0,370	0,330	0,230	0,560
1969	0,400	0,410	0,710	0,750	1,370	1,830	2,100	0,750	0,460	0,240	0,280	0,260
1970	0,360	0,570	1,170	1,500	0,660	1,690	3,100	1,960	0,460	0,340	0,410	0,270
1971	0,360	0,210	0,610	0,870	1,420	1,090	1,310	0,730	0,650	0,720	0,430	0,160
1972	0,450	0,470	0,880	1,290	1,120	1,510	1,010	1,300	0,770	0,750	0,350	0,780
1973	0,680	0,400	0,630	1,820	0,790	2,010	1,390	0,790	1,260	0,580	0,470	0,730
1974	0,780	0,610	1,330	0,710	1,390	1,470	1,120	0,440	0,900	0,360	0,350	0,350
1975	0,062	0,012	0,241	0,216	0,265	0,281	0,968	0,298	0,231	0,105	0,134	0,443
1976	0,076	0,190	0,731	0,314	0,284	0,285	0,189	0,060	0,055	0,444	0,045	0,252
1977	0,058	0,318	0,140	0,894	0,738	1,193	1,344	0,254	0,394	0,221	0,205	0,179
1978	0,161	0,657	0,415	0,449	0,551	0,892	0,884	0,729	0,687	0,154	0,143	0,227
1979	0,308	0,488	0,398	0,125	0,640	0,859	0,652	0,298	0,417	0,134	0,125	0,108
1980	0,098	0,909	0,877	0,479	0,595	1,599	0,206	0,312	0,224	0,222	0,181	0,157
1981	0,186	0,151	1,247	0,256	0,401	0,604	0,461	0,166	0,154	0,134	0,125	0,563
1982	0,191	0,410	0,221	0,256	0,825	1,390	0,504	0,413	0,269	0,171	0,159	0,283
1983	0,147	0,321	0,920	0,117	0,578	0,269	0,235	0,459	0,102	0,366	0,082	0,072
1984	0,270	0,062	0,096	0,937	1,394	0,550	1,014	0,920	0,489	0,227	0,204	0,177
1985	0,320	0,820	1,600	1,320	1,010	1,330	2,240	0,630	0,480	0,200	0,250	0,380
1986	0,470	0,750	1,350	1,430	1,000	1,970	0,840	1,500	1,160	0,690	1,550	1,380
1987	0,450	0,950	0,900	1,250	0,510	1,870	1,870	0,790	0,570	0,730	0,270	0,270
1988	0,420	0,530	1,420	1,150	1,140	1,020	2,440	0,870	0,680	0,370	0,530	0,550
1989	0,500	0,200	0,550	1,540	1,000	1,920	2,540	1,100	0,330	0,400	0,590	0,660
Média	0,363	0,449	0,799	0,842	0,840	1,190	1,251	0,698	0,505	0,359	0,323	0,400