

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

**METODOLOGIA PARA APOIO À GESTÃO ESTRATÉGICA DE  
RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS:  
O CASO DO LAGO PARANOÁ, NO DISTRITO FEDERAL**

**VIVIANE AZZOLIN DE CARVALHO PIRES**

**ORIENTADOR: PROF. OSCAR DE MORAES CORDEIRO NETTO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E  
RECURSOS HÍDRICOS

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM – 072 / 04  
BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO – 2004

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

**METODOLOGIA PARA APOIO À GESTÃO ESTRATÉGICA  
DE RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS:  
O CASO DO LAGO PARANOÁ, NO DISTRITO FEDERAL**

**VIVIANE AZZOLIN DE CARVALHO PIRES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

APROVADA POR:

---

**Prof. Oscar de Moraes Cordeiro Netto, Doutor (UnB)**  
(ORIENTADOR)

---

**Prof. Marco Antonio Almeida de Souza, PhD (UnB)**  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

**Prof. Cesar Augusto Pompêo, Doutor (UFSC)**  
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 29 DE NOVEMBRO DE 2004

## FICHA CATALOGRÁFICA

### **PIRES, VIVIANE AZZOLIN DE CARVALHO**

Metodologia para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos: o caso do lago Paranoá, no Distrito Federal [Distrito Federal] 2004.

203 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2004).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                                     |                                    |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Gestão de reservatórios          | 2. Reservatórios de usos múltiplos |
| 3. Simulação de cenários            | 4. Métodos multicritério           |
| 5. Balanço hídrico de reservatórios |                                    |
| I. ENC/FT/UnB                       | II. Título (série)                 |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PIRES, V. A. C. (2004). Metodologia para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos: o caso do lago Paranoá, no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM - 072/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 203 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Viviane Azzolin de Carvalho Pires.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Metodologia para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos: o caso do lago Paranoá, no Distrito Federal.

GRAU: Mestre

ANO: 2004

É concedida à Universidade de Brasília permissão para produzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

---

Viviane Azzolin de Carvalho Pires

SQSW 504 Bloco C, Ap.203.  
CEP 70.673-503 Brasília – DF – Brasília

*À minha filha querida, Letícia,  
pelo amor maior do mundo e pela compreensão inconsciente quanto às minhas ausências;  
À minha mãe, Neiva,  
pela amizade e pela grande ajuda em todos os momentos;  
Ao meu marido, André,  
por compartilhar sua visão sensata do mundo e pela paciência nos momentos difíceis;  
Ao meu amigo Antônio,  
pela ajuda para descobrir minha força;  
Aos meus familiares e amigos, pelo amor e carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento desse trabalho contou com o apoio e a contribuição de muitos, pelo que sou muito grata.

Ao professor Oscar de Moraes Cordeiro Netto, meu orientador, pelos comentários sempre inteligentes e pela ótima convivência.

À Caesb – Companhia de Saneamento do Distrito Federal, pelo incentivo institucional à realização do curso de mestrado.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, pelos conhecimentos compartilhados. Agradecimentos especiais aos professores Marco Antonio Almeida de Souza, Sérgio Koide, Nestor Aldo Campana e Nabil Joseph Eid, pela colaboração no decorrer do trabalho.

À Caesb e à CEB, pela cessão dos dados necessários à realização do trabalho.

Ao Wagner Moreti (CEB), ao Augusto Maia (Caesb) e ao professor Paulo Sérgio Bretas Salles, pelo grande apoio ao longo do trabalho.

A todos os entrevistados, pelo tempo e atenção dispensados e pelos comentários valiosos.

A todos os colegas e amigos do Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, pelo carinho e companheirismo em todos os momentos.

## **RESUMO**

### **METODOLOGIA PARA APOIO À GESTÃO ESTRATÉGICA DE RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS: O CASO DO LAGO PARANOÁ, NO DISTRITO FEDERAL**

**Autor: Viviane Azzolin de Carvalho Pires**

**Orientador: Oscar de Moraes Cordeiro Netto**

**Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos**

**Brasília, novembro de 2004**

Nesta pesquisa, foi proposto um suporte metodológico para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos. Esse suporte consiste de um modelo de simulação do reservatório em estudo, em termos de quantidade de água (nível d'água, vazão defluente e tempo de residência hidráulica) e de qualidade da água (nível trófico), associado a um modelo multicritério simples, inspirado no trabalho de Tilmant *et al.* (2002a), para consideração dos múltiplos usos. Os estados do reservatório, obtidos para as condições simuladas de utilização da água, são confrontados com metas de satisfação quanto às demandas de quantidade e de qualidade da água, definidas para cada uso. Os graus resultantes de satisfação de cada uso são ponderados por pesos indicativos da importância relativa entre os usos, fornecendo o grau de satisfação global proporcionado pela operação do reservatório. Esse índice global reflete, indiretamente, o potencial de conflitos entre os usos simulados.

O lago Paranoá, no Distrito Federal, foi escolhido como caso de aplicação da metodologia proposta. Nesse sentido, foi feito um estudo hidrológico de balanço hídrico do reservatório, que permitiu o desenvolvimento do componente de simulação do suporte metodológico. Também foram feitos estudos acerca do tempo de residência hidráulica e da permanência de vazões no reservatório, bem como uma análise da evolução da qualidade da água, que forneceram subsídios para a avaliação do contexto atual de utilização da água e das potencialidades e conflitos de uso passíveis de ocorrer no futuro.

Foram feitas aplicações do suporte metodológico em diferentes cenários de utilização da água do lago Paranoá, que variaram tanto no que se refere às retiradas de água como ao aporte de fósforo ao reservatório. Os resultados das simulações foram considerados consistentes. Foram feitas consultas a especialistas, gestores e usuários, que permitiram concluir que a metodologia empregada para o desenvolvimento da ferramenta foi satisfatória.

**PALAVRAS-CHAVE:** gestão de reservatórios, reservatórios de usos múltiplos, simulação de cenários, métodos multicritério, balanço hídrico de reservatórios.

## **ABSTRACT**

### **“DECISION-AID SUPPORT TO THE STRATEGIC MANAGEMENT OF MULTIPURPOSE RESERVOIRS: THE CASE OF PARANOÁ LAKE, IN THE FEDERAL DISTRICT OF BRAZIL”**

**Author: Viviane Azzolin de Carvalho Pires**

**Supervisor: Oscar de Moraes Cordeiro Netto**

**Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos  
Brasília, November of 2004**

In this research, a methodology was proposed to support the strategical management of multi-purpose reservoirs. This methodology consists of a simulation model of the reservoir in study, in terms of amount of water (water level, outflow and hydraulical residence time) and of water quality (trofic level), associated to a simple multicriteria model, inspired in the work of Tilmant *et al.* (2002a), in order to consider the different uses. The states of the reservoir, obtained for the simulated conditions of water use, are confronted with goals of satisfaction of water quantity and water quality requirements, defined for each use. The resulting degrees of satisfaction of each use are weighted by the relative importance among the uses, giving the global degree of satisfaction provided by the reservoir operation. This global index reflects, indirectly, the potential conflicts between the simulated uses.

The Paranoá lake, in the Federal District of Brazil, was chosen to be the application case for the proposed methodology. To do that, a hydrological study of the reservoir water balance was undertaken, which enabled the development of the simulation model of the methodological support system. Studies were also done about the hydraulic residence time and the permanence of flows in the reservoir, as well as an analysis of the water quality evolution through the last years, which gave subsidies for the assessment of the current and the possible water uses and the potential future conflicts between them.

Different water use scenarii of the Paranoá lake were simulated by the methodological support system, which varied as much for the water withdrawals as for the phosphorus loading to the reservoir. The simulation results were considered consistent. Specialists, users and managers were consulted about the methodology applied in the development of the tool, which was considered satisfactory by them.

**KEY WORDS:** reservoir management, multipurpose reservoirs, scenarii simulation, multicriteria techniques, water balance of reservoirs.



# SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 - OBJETIVOS</b> .....	4
<b>3 – REFERENCIAL TEÓRICO E CONCEITUAL</b> .....	5
<b>3.1 - GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS</b> .....	5
3.1.1 - Considerações gerais .....	5
3.1.2 - Reservatórios de usos múltiplos .....	9
<b>3.2 - MODELOS APLICÁVEIS À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS</b> .....	12
3.2.1 - Considerações gerais .....	12
3.2.2 - Modelos de simulação .....	14
3.2.3 - Modelos de otimização monocritério.....	15
3.2.3.1 - Programação linear (PL).....	15
3.2.3.2 - Programação não-linear (PNL).....	17
3.2.3.3 - Programação dinâmica (PD) .....	17
3.2.4 - Modelos multicritério.....	19
3.2.4.1 - Modelos baseados na abordagem de critério único de síntese .....	22
3.2.4.2 - Modelos baseados na abordagem de subordinação ou desclassificação ...	24
3.2.4.3 - Modelos baseados na abordagem do julgamento local interativo .....	26
<b>3.3 - ASPECTOS ESPECÍFICOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DE LAGOS – EUTROFIZAÇÃO DE LAGOS TROPICAIS</b> .....	27
3.3.1 - Eutrofização de lagos e reservatórios tropicais .....	27
3.3.2 - Modelos de estimativa do nível trófico de lagos e reservatórios: o modelo Cepis .....	30
<b>4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	35
<b>4.1 - MODELOS APLICADOS À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS</b> .....	35
<b>4.2 - MODELOS APLICADOS À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS PARA CONTROLE DA QUALIDADE DA ÁGUA</b> .....	52

<b>5 - METODOLOGIA .....</b>	<b>55</b>
<b>6 - CASO DE ESTUDO: O LAGO PARANOÁ .....</b>	<b>59</b>
<b>6.1 - CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA .....</b>	<b>59</b>
6.1.1 - Unidade hidrográfica Santa Maria/Torto .....	60
6.1.2 - Unidade hidrográfica do Bananal .....	60
6.1.3 - Unidade hidrográfica do riacho Fundo .....	62
6.1.4 - Unidade hidrográfica do Gama .....	62
6.1.5 - Unidade hidrográfica do lago Paranoá .....	62
<b>6.2 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS .....</b>	<b>63</b>
6.2.1 - Balanço hídrico do lago Paranoá .....	63
6.2.1.1 - Base de dados .....	63
6.2.1.2 - Metodologia .....	65
6.2.1.3 - Desenvolvimento .....	66
6.2.1.4 - Resultados .....	73
6.2.2 - Tempo de residência hidráulica do lago Paranoá .....	80
6.2.3 - Estudo de permanência de vazões .....	83
<b>6.3 - EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO LAGO PARANOÁ .....</b>	<b>84</b>
6.3.1 - Características morfológicas e hidrodinâmicas do lago Paranoá .....	84
6.3.2 - Apresentação e análise dos dados .....	89
6.3.2.1 - Fósforo total .....	90
6.3.2.2 - Fitoplâncton, clorofila-a e transparência .....	98
6.3.2.3 - Balneabilidade .....	101
6.3.2.4 - Testes estatísticos .....	101
6.3.2.5 - Conclusões .....	105
<b>6.4 - USOS PREPONDERANTES .....</b>	<b>106</b>
6.4.1 - Recreação e paisagismo.....	106
6.4.2 - Diluição de esgotos e águas pluviais.....	106
6.4.3 - Geração de energia elétrica .....	108
6.4.4 - Pesca profissional .....	110
<b>6.5 - ANÁLISE DO CONTEXTO ATUAL DE CONFLITOS ENTRE USOS .....</b>	<b>112</b>
<b>6.6 - USOS POTENCIAIS DO LAGO PARANOÁ .....</b>	<b>113</b>

<b>7 - O SUPORTE METODOLÓGICO PROPOSTO PARA APOIO À GESTÃO ESTRATÉGICA DE RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS</b> .....	121
<b>7.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	121
<b>7.2 - ESTRUTURA GERAL DO SUPORTE METODOLÓGICO</b> .....	122
<b>7.3 - O SUPORTE METODOLÓGICO IMPLEMENTADO PARA O CASO DO LAGO PARANOÁ, NO DISTRITO FEDERAL</b> .....	127
<b>7.4 - APLICAÇÃO DO SUPORTE METODOLÓGICO AO CASO DO LAGO PARANOÁ/DF</b> .....	135
<b>7.4.1 - Simulação 1</b> .....	138
<b>7.4.2 - Simulação 2</b> .....	145
<b>7.4.3 - Simulação 3</b> .....	149
<b>7.4.4 - Análise dos resultados das simulações</b> .....	153
<b>7.5 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA</b> .....	157
<b>7.5.1 - Análise de consistência das respostas do protótipo do suporte metodológico</b> .....	157
<b>7.5.2 - Consultas a especialistas, usuários e gestores</b> .....	157
<b>8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	164
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	172
<b>APÊNDICES</b> .....	181
<b>APÊNDICE A – SÉRIES HIDROLÓGICAS DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS, PLUVIOMÉTRICOS E EVAPORIMÉTRICO CONSIDERADOS NOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS; SÉRIES DE VAZÕES EFLUENTES DAS ETES BRASÍLIA NORTE E BRASÍLIA SUL</b> .....	182
<b>APÊNDICE B – RELAÇÃO DAS PESSOAS CONSULTADAS NA ETAPA DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA</b> .....	202

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparativo entre os paradigmas racionalista e construtivista (Ensslin <i>et al.</i> , 2001, adaptado) .....	12
Tabela 3.2 – Escala de valores adotados no Processo Hierárquico Analítico para a comparação pareada entre objetivos e alternativas (Braga e Gobetti, 1997, adaptado) ..	23
Tabela 3.3 – Vinculação entre os usos da água e os graus de trofia em um corpo d'água (von Sperling, 1996, adaptado) .....	34
Tabela 4.1 – Aplicações da Programação Dinâmica à otimização da operação de reservatórios de usos múltiplos .....	37
Tabela 6.1 – Estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas .....	63
Tabela 6.2 – Valores de coeficiente de escoamento superficial estimados para as áreas de drenagem dos postos fluviométricos Riacho Fundo montante Zôo e Bananal EPIA-003 .....	70
Tabela 6.3 – Coeficientes de escoamento superficial adotados para estimativa da drenagem pluvial .....	71
Tabela 6.4 – Coeficientes de Pearson entre as séries $\Delta S$ e $(I - O)$ .....	74
Tabela 6.5 – Balneabilidade do lago Paranoá em 1998 e 2000 (dados: Caesb) .....	102
Tabela 6.6 – Resultados do teste “t” de Student aplicado ao período de 1999 a 2002 ....	104
Tabela 7.1 – Intervalos dos graus de satisfação de diferentes usos quanto aos aspectos de quantidade e de qualidade da água .....	125
Tabela 7.2 – Cargas de fósforo total (kg/dia) estimadas para os cenários de expansão urbana da bacia do lago Paranoá (Concremat, 2003) .....	137
Tabela 7.3 – Demandas de água para irrigação na bacia do lago Paranoá (dados: Magna Engenharia, 2004a) .....	138
Tabela 7.4 – Configuração de usos da primeira simulação .....	138
Tabela 7.5 – Definição das funções de satisfação dos usos da primeira simulação .....	139
Tabela 7.6 – Resultados da Simulação 1, considerando o cenário de referência para o aporte de fósforo .....	142
Tabela 7.7 – Resultados da Simulação 1, considerando o cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago .....	143
Tabela 7.8 – Resultados da Simulação 1, considerando o cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago .....	144

Tabela 7.9 – Configuração de usos da segunda simulação .....	145
Tabela 7.10 – Estimativas de demandas de água para abastecimento de algumas áreas da bacia do lago Paranoá (dados: Magna Engenharia, 2000b) .....	146
Tabela 7.11 – Vazões captáveis no ribeirão Bananal (dados: NCA, 2003) .....	147
Tabela 7.12 – Definição das funções de satisfação dos usos da segunda simulação .....	148
Tabela 7.13 – Resultados da Simulação 2, considerando o cenário de referência para o aporte de fósforo .....	149
Tabela 7.14 – Resultados da Simulação 2, considerando o cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago .....	150
Tabela 7.15 – Resultados da Simulação 2, considerando o cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago .....	151
Tabela 7.16 – Configuração de usos da terceira simulação .....	152
Tabela 7.17 – Resultados da Simulação3, para o ano de 2030, considerando o cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago .....	153
Tabela 7.18 – Comparação dos resultados da Simulação 1, ano 2030, para os cenários com e sem controle ambiental da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago .....	154
Tabela 7.19 – Comparação dos resultados da Simulação 2, ano 2030, para os cenários com e sem controle ambiental da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago .....	154
Tabela 7.20 – Possíveis usos (diretos e indiretos) da água do lago Paranoá .....	159
Tabela 7.21 – Pesos atribuídos pelos entrevistados aos usos possíveis (diretos e indiretos) da água do lago Paranoá .....	160
Tabela A.1 – Vazões médias mensais, em m <sup>3</sup> /s, do riacho Fundo (posto fluviométrico: Montante Zoológico - 60478200), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	183
Tabela A.2 – Vazões médias mensais, em m <sup>3</sup> /s, do ribeirão do Gama (posto fluviométrico: Base Aérea - 60478500), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	184
Tabela A.3 – Vazões médias mensais, em m <sup>3</sup> /s, do córrego Cabeça de Veado (posto fluviométrico: Dom Bosco - 60478600), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	185
Tabela A.4 – Vazões médias mensais, em m <sup>3</sup> /s, do ribeirão do Torto (posto fluviométrico: Montante Paranoá - 60477400), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	186
Tabela A.5 – Vazões médias mensais, em m <sup>3</sup> /s, do ribeirão Bananal (posto fluviométrico: EPIA-003 - 60477600), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	187

Tabela A.6 – Vazões médias mensais, em m <sup>3</sup> /s, defluentes na barragem do Paranoá (posto pluviométrico: Barragem Paranoá - 60479200), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: CEB).....	188
Tabela A.7 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico da ETE Brasília Sul (01547008), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	189
Tabela A.8 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico da ETE Brasília Norte (01547009), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	190
Tabela A.9 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do Contagem (01547010), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	191
Tabela A.10 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico da Área Alfa (01547014), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	192
Tabela A.11 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico de Santa Maria (01547017), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	193
Tabela A.12 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do Jockey Clube (01547018), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	194
Tabela A.13 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do Cabeça de Veado (01547019), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	195
Tabela A.14 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico da Barragem do Paranoá (01547020), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	196
Tabela A.15 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do Jatobazinho (01548009), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	197
Tabela A.16 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do riacho Fundo GM-3 (01548010), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	198
Tabela A.17 – Vazões efluentes totais mensais, em m <sup>3</sup> /s, lançadas pela ETE Brasília Sul no lago Paranoá, de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	199
Tabela A.18 – Vazões efluentes totais mensais, em m <sup>3</sup> /s, lançadas pela ETE Brasília Norte no lago Paranoá, de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).....	200
Tabela A.19 – Evaporação média mensal, em mm/dia, do tanque evaporimétrico tipo classe A da Estação UnB-I, de 1979 a 2002 (fonte dos dados: ENC/UnB).....	201

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Distribuição de probabilidade de nível trófico de lagos quentes tropicais, a partir do fósforo total (Salas e Martino, 1990, adaptado de Vollenweider e Kerekes, 1981) .....	33
Figura 5.1 – Fluxograma da metodologia de desenvolvimento do trabalho .....	58
Figura 6.1 – Carta de unidades hidrográficas da bacia do lago Paranoá (Semarh, 2001, adaptado) .....	61
Figura 6.2 – Delimitação da bacia do lago Paranoá e suas sub-bacias e indicação dos postos fluviométricos e pluviométricos utilizados .....	64
Figura 6.3 – Postos fluviométricos utilizados e respectivos polígonos de Thiessen .....	69
Figura 6.4 – Balanço hídrico do lago Paranoá, para o período de 1979 a 2002 .....	73
Figura 6.5 – Diferenças $[S(t + 1) - S(t)] - [I(t) - O(t)]$ .....	74
Figura 6.6 – Parcelas do balanço de entradas e saídas do lago Paranoá (ano de 2002) ...	75
Figura 6.7 – Balanço hídrico de longo período (1979 a 2002) do lago Paranoá .....	76
Figura 6.8 – Balanço hídrico de longo período (1979 a 2002) dos segmentos do lago Paranoá .....	77
Figura 6.9 – Balanço hídrico de longo período (1992 a 2002) do lago Paranoá .....	78
Figura 6.10 – Balanço hídrico de longo período (1992 a 2002) dos segmentos do lago Paranoá .....	79
Figura 6.11 – Diferenças acumuladas entre a precipitação direta sobre o espelho d'água do Lago em cada período e a respectiva precipitação direta média de longo período .....	80
Figura 6.12 – Tempo de residência hidráulica do lago Paranoá .....	81
Figura 6.13 – Tempo de residência marginal mensal do lago Paranoá .....	82
Figura 6.14 – Curvas de permanência das vazões defluentes totais (turbinadas + vertidas) na barragem do Paranoá, de 1979 a 2002 .....	83
Figura 6.15 – Curvas de permanência das vazões defluentes totais (turbinadas + vertidas) na barragem do Paranoá, de 1999 a 2002 .....	84
Figura 6.16 – Carta isobática do lago Paranoá (Semarh, 2001, adaptado) .....	86
Figura 6.17 – Temperatura da água nos 5 segmentos do lago Paranoá (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	87

Figura 6.18 – Oxigênio dissolvido na água dos 5 segmentos do lago Paranoá (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	88
Figura 6.19 – Pontos de monitoramento da qualidade da água do lago Paranoá pela Caesb (Burnett <i>et al.</i> 2001) .....	89
Figura 6.20 – Fósforo total no ponto A do Lago (braço do Riacho Fundo) e no tributário riacho Fundo (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	93
Figura 6.21 – Fósforo total no ponto B do Lago (braço do Gama/Cabeça de Veado) e no tributário ribeirão do Gama (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	94
Figura 6.22 – Fósforo total no ponto D do Lago (braço do Torto) e no tributário ribeirão do Torto (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	95
Figura 6.23 – Fósforo total no ponto E do Lago (braço do Bananal) e no tributário ribeirão Bananal (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	96
Figura 6.24 – Fósforo total no ponto C (zona central) do Lago (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	97
Figura 6.25 – Fitoplâncton e clorofila-a nos 5 segmentos do lago Paranoá (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	99
Figura 6.26 – Transparência da água nos 5 segmentos do lago Paranoá (dados: Laboratório Central da Caesb) .....	100
Figura 6.27 – Localização dos pontos de coleta do programa monitoramento da balneabilidade do lago Paranoá, realizado pela Caesb .....	103
Figura 7.1 – Estrutura do suporte metodológico proposto para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos (casos genéricos) .....	123
Figura 7.2 – Função sigmóide $f(x) = 1/(1+e^{-ax})$ .....	129
Figura 7.3 – Estrutura do protótipo do suporte metodológico para apoio à gestão estratégica dos usos da água do lago Paranoá .....	133
Figura 7.4 – Metas mensais de nível d'água e de volume armazenado no lago Paranoá, segundo o esquema operativo considerado nas simulações (dados: CEB, comunicação pessoal de Wagner Moreti) .....	136
Figura 7.5 – Resultados da Simulação 2 (vazões retiradas para abastecimento e graus de satisfação da produção de energia, ao longo de todo o período simulado), para o ano de 2030 e cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana .....	156
Figura 7.6 – Resultados da Simulação 3 (vazões retiradas para abastecimento e graus de satisfação da produção de energia, ao longo de todo o período simulado), para o ano de 2030 e cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana .....	156



## LISTA DE SIGLAS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ANA.....	Agência Nacional de Águas
ASCE.....	American Society of Civil Engineers
Caesb.....	Companhia de Saneamento do Distrito Federal
CBH .....	Comitê de Bacia Hidrográfica
CEB.....	Companhia Energética de Brasília
Cepis .....	Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental
Codeplan.....	Companhia do Desenvolvimento do Planalto Central
Conama .....	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Dnocs .....	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
Electre .....	Elimination and (Et) Choice Translating Reality
Embrapa .....	Empresa brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPIA.....	Estrada Parque de Indústria e Abastecimento
ETE.....	Estação de Tratamento de Esgotos
ETEB.....	Estação de Tratamento de Esgotos de Brasília
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Ibama .....	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
Inmet .....	Instituto Nacional de Meteorologia
Novacap .....	Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
PL.....	Programação Linear
PNL.....	Programação Não-Linear
PD.....	Programação Dinâmica
PDD.....	Programação Dinâmica Determinística
PDE.....	Programação Dinâmica Estocástica
Promethee .....	Preference Ranking Organization
RA.....	Região Administrativa
SAAN.....	Setor de Armazenagem e Abastecimento Norte
Semarh .....	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal
Semops .....	Sequential Multiobjective Problem Solving Technique
SMPW.....	Setor de Mansões Park Way
UHE .....	Usina Hidrelétrica
UnB .....	Universidade de Brasília

## **1 - INTRODUÇÃO**

A Lei 9.433/97 (Brasil, 1997) definiu as bases para o gerenciamento dos recursos hídricos do Brasil, sendo um de seus fundamentos a gestão integrada e participativa, com vistas a viabilizar a multiplicidade de usos. Uma das evoluções que vêm ocorrendo desde então refere-se à implementação de processo descentralizado e participativo para a gestão de reservatórios de usos múltiplos.

A participação do conjunto de usuários e colegiados de bacia no processo de gestão de reservatórios permite que se levem em consideração os diferentes interesses no aproveitamento da água, o que favorece a obtenção de soluções de consenso, mas aumenta a complexidade do processo decisório.

Com vistas a tratar de modo mais apropriado a complexidade resultante da diversidade de objetivos e de interesses no uso da água, os métodos de programação matemática, antes preferidos para a definição de políticas ótimas de operação de reservatórios, têm dado lugar a outras abordagens de auxílio à decisão, como a simulação de cenários e os métodos multicritério.

Deve-se ressaltar, ainda, que a identificação dos aspectos relevantes à tomada de decisão pressupõe a compreensão de questões técnicas específicas. Isso faz com que uma importante função dessas novas abordagens de auxílio à decisão seja a de promover a capacitação técnica dos atores envolvidos no processo decisório, favorecendo a efetividade da gestão participativa.

Nesse sentido, desenvolvimentos metodológicos que abordem essas questões constituem-se em temática prioritária à luz da pesquisa aplicada à gestão de recursos hídricos.

Segundo tipologia proposta pela Teoria da Administração (Chiavenato, 1994), que pode ser aplicada à área de Recursos Hídricos, os processos de planejamento e de tomada de decisão podem ser classificados em três grandes níveis hierárquicos:

- estratégico, que se refere à definição de objetivos e ao estabelecimento de prioridades para o longo prazo, estando o sistema sujeito a muitas incertezas;

- tático ou gerencial, que se refere às atividades de planejamento, execução e controle, desenvolvidas com vistas ao atingimento de metas e resultados no curto e médio prazos, ou seja, é o nível em que as decisões estratégicas se traduzem em planos concretos de ação;
- operacional, que se refere às tarefas e procedimentos a serem adotados com vistas à maximização dos resultados, ou seja, à implementação das decisões gerenciais na operação em tempo real (Porto e Azevedo, 1997).

Como descreve Souza Filho e Gouveia (2001), um exemplo de decisão em nível operacional é a operação isolada de um reservatório, em que se procede a pequenos ajustes na liberação das vazões, em tempo real, com vistas ao atendimento de demandas instantâneas e restrições de segurança, respeitando-se as diretrizes estabelecidas no plano tático. Dentre as decisões táticas, podem-se citar as outorgas de curto prazo e a definição da regra de operação anual do reservatório. Por fim, decisões em nível estratégico envolvem questões de longo prazo, como os planos de recursos hídricos de bacias hidrográficas, os quais definem os objetivos a serem atingidos com a operação do reservatório e as prioridades na satisfação das demandas, assim como as outorgas de longo período, entre outras questões.

Buscou-se, nesta dissertação, desenvolver as bases de um suporte metodológico para auxílio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos, tendo o lago Paranoá, no Distrito Federal, como o caso de aplicação. Formado artificialmente em 1959, já com os objetivos múltiplos de paisagismo, recreação e geração de energia elétrica, o Lago também serve à diluição e à depuração de águas servidas geradas na sua bacia (drenagem urbana e esgotos) e à pesca profissional em dois de seus cinco segmentos.

O lago Paranoá sofreu intensa eutrofização ao longo dos anos, mas teve esse processo de degradação revertido e controlado, após a adoção de medidas de redução do aporte de nutrientes – tratamento de esgotos domésticos em nível terciário, com polimento químico final para remoção de nutrientes – e o estabelecimento de restrições à ocupação da bacia de drenagem. Essa experiência, de reversão e controle bem sucedidos da eutrofização de um lago urbano, é considerada única no País, tendo em vista a complexidade técnica da solução e os elevados investimentos associados.

A bacia do lago Paranoá é uma das regiões mais densamente ocupadas do Distrito Federal, apresentando grande concentração de renda, empregos e serviços. Essa configuração é decorrente da própria concepção urbana e territorial da capital federal. Nesse cenário, o Lago tem assumido crescente importância para a cidade, dada sua inserção no contexto urbano e a recuperação de sua qualidade ambiental. Por outro lado, tem-se tornado difícil o controle efetivo sobre os usos e a ocupação do solo da bacia de drenagem, gerando pressões ambientais sobre o Lago, que podem afetar o ecossistema lacustre e comprometer os usos atuais e futuros que sejam mais exigentes quanto à qualidade da água.

Pelos motivos expostos, julgou-se pertinente a proposição de suporte metodológico que venha a contribuir para as decisões do Comitê de Bacia sobre as diretrizes de gestão estratégica do Lago, visando a compatibilizar as demandas atuais e futuras da sociedade à continuidade dos usos ambientais e dos processos ecológicos que ocorrem nesse ecossistema.

O texto ora apresentado está organizado em 8 capítulos. Os dois primeiros, incluindo o presente, introduzem o tema e a justificativa do trabalho desenvolvido, bem como descrevem seus objetivos. O terceiro capítulo traz discussão sucinta dos aspectos gerais do marco teórico relacionado ao tema. No quarto capítulo, apresenta-se a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho e, no quinto capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica. O sexto capítulo apresenta as características do lago Paranoá, em que se apresentam o balanço hídrico do reservatório e uma análise da evolução da qualidade da água do Lago ao longo dos últimos anos e dos usos atuais e potenciais da água. O sétimo capítulo apresenta a estrutura do suporte metodológico proposto, as simulações realizadas e a avaliação dos resultados da pesquisa. Por fim, o último capítulo apresenta as conclusões do presente trabalho, bem como as recomendações para pesquisas e estudos futuros.

## 2 - OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é a proposição de suporte metodológico para auxílio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos. Em termos sucintos, o suporte metodológico visa a simular os efeitos sobre o balanço hídrico e a condição trófica do reservatório, resultantes de diferentes decisões quanto aos usos da água e quanto à ocupação de sua bacia de drenagem.

O suporte metodológico foi concebido de modo a constituir ferramenta passível de ser utilizada por membros de Comitês ou Associações de Bacia, ou, individualmente, por responsáveis pela formulação e análise de alternativas de planejamento de uso e ocupação do solo. Parte-se do princípio de que o desenvolvimento de um suporte dessa natureza contribui para um maior conhecimento do sistema e uma maior capacitação dos membros dos Comitês, favorecendo decisões consensuais e mais elaboradas acerca da gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos, no contexto da nova Política Nacional de Recursos Hídricos.

O suporte metodológico foi implementado em nível de protótipo, especificamente para aplicação ao caso do lago Paranoá, no Distrito Federal, com algumas simplificações em vista de peculiaridades desse reservatório. Considera-se, entretanto, que o suporte metodológico proposto pode ser aplicado a casos genéricos, sendo necessária sua implementação em ambiente computacional apropriado e sem as simplificações adotadas.

Os objetivos específicos, relacionados à aplicação do suporte metodológico ao caso do lago Paranoá, são:

- O estudo do comportamento hidrológico do lago Paranoá, com o desenvolvimento de um modelo de balanço hídrico do reservatório. Esse modelo permitiu estimar, a partir das séries históricas de precipitação e de vazão dos tributários principais do Lago, as séries correspondentes às contribuições da drenagem urbana e do escoamento subterrâneo, que foram utilizadas no modelo de simulação do reservatório, componente do suporte metodológico proposto.
- A análise da evolução da qualidade da água do lago Paranoá, que forneceu subsídios para a avaliação dos usos atuais e potenciais das águas do Lago e de seus tributários.

### **3 - REFERENCIAL TEÓRICO E CONCEITUAL**

Identificam-se três áreas temáticas principais, cuja conceituação e discussão se mostram pertinentes e necessárias ao desenvolvimento do trabalho proposto.

A primeira delas diz respeito ao estudo de questões relacionadas à gestão de recursos hídricos, especialmente daqueles sujeitos a múltiplos usos, à luz, entre outros, dos princípios da Lei Federal n.º 9.433/97 (Brasil, 1997). No âmbito desse tema, são discutidas as potencialidades associadas à participação pública no processo decisório.

O segundo tema refere-se às abordagens de auxílio à decisão aplicáveis a problemas de gerenciamento de recursos naturais sujeitos a múltiplas utilizações. No bojo dessa linha temática, são analisados os modelos de simulação, os modelos de otimização monocritério e os modelos de análise multicritério.

O terceiro e último tema consiste no estudo de metodologias adequadas à representação de lagos e reservatórios. Nesse contexto, e tendo em vista a especificidade do caso de aplicação, são estudados aspectos relativos à eutrofização de lagos tropicais, com ênfase no modelo desenvolvido pelo Cepis – Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ciências do Ambiente (Salas e Martino, 1990). Considerando-se que as bases conceituais de estudos de balanço hídrico são bem estabelecidas, optou-se por descrevê-las no contexto da metodologia adotada para a realização do balanço hídrico do lago Paranoá, apresentada no item 6.2.1.

#### **3.1 - GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

##### **3.1.1 - Considerações gerais**

A água é, reconhecidamente, um recurso escasso. Apesar da grande quantidade de água existente em nosso planeta, estima-se que somente cerca de 3% constituam água adequada para o consumo humano, e, desses 3%, menos de 1% está disponível em mananciais superficiais (Cosgrove, 2002). Além da disponibilidade restrita de água apropriada para os usos humanos, concorre para a mencionada escassez o crescimento do contingente

populacional e de suas demandas. Ainda, segundo esse autor, no século XX, a população mundial triplicou, enquanto que a demanda por água para atividades do homem foi multiplicada por seis.

Além de escassa, a água é um recurso vulnerável. Por ser substância indispensável à vida, as sociedades, sempre que possível, optaram por se estabelecer nas proximidades de fontes de água. Dito de outro modo, a escassez de recursos hídricos em quantidade e qualidade adequadas aos usos humanos, apesar de não inviabilizar totalmente o estabelecimento de atividades humanas, constitui fator limitante ao seu desenvolvimento. A vulnerabilidade da água decorre do fato de que a atividade antrópica intensiva resulta, de um lado, na superexploração dos recursos existentes, o que compromete a quantidade de água disponível, e, de outro, em diversos tipos de poluição e desequilíbrios ecológicos, os quais ameaçam a qualidade da água.

Outra característica importante dos recursos hídricos é sua distribuição aleatória e irregular no tempo e no espaço, em função de condições geográficas e climato-meteorológicas, o que leva à escassez em algumas áreas e épocas e à abundância em outras. Apesar de a vazão média de longo período ser indicativa do potencial hídrico de uma bacia, quanto mais significativas forem as variações sazonais e interanuais no regime hidrológico, menor será a disponibilidade hídrica para aproveitamento econômico. Por isso, a água, apesar de ser recurso renovável, pode ser considerada recurso finito e de ocorrência aleatória (Barth, 1987).

Enquanto a oferta de água é abundante, as demandas são exercidas livremente. Até há poucos anos, a gestão dos recursos hídricos limitava-se, quase que exclusivamente, à redistribuição da água para os centros de consumo, no local e momento desejados. (Cosgrove, 2002). Entretanto, o crescimento da demanda pela água intensificou, de um lado, as situações de escassez, vulnerabilidades e conflitos de usos, e, de outro, as necessidades de controle da utilização e de preservação dos mananciais. Nesse contexto, a água assume valor econômico, o qual depende, basicamente, da quantidade e da qualidade da água disponível e demandada pelos diferentes usos.

Além disso, esse novo contexto exigiu a modificação do tratamento dispensado às questões relativas aos recursos hídricos. A abordagem setorial, até então predominante, em que os

usuários e os próprios gestores públicos lidavam com a água levando em conta necessidades e pontos de vista particulares, deu lugar à abordagem integrada. Segundo essa nova abordagem, os sistemas hídricos passam a ser considerados como uma parte do ambiente, e, sendo assim, as políticas de recursos hídricos obrigam-se a interagir com as políticas de planejamento urbano e ambiental.

Apesar de o ideário subjacente a essa nova postura ter sido rapidamente adotado em escala global, van Rooy *et al.* (1998) destacam que a implementação efetiva da gestão integrada dos recursos hídricos não acompanhou o ritmo da sua teoria, devido a problemas “culturais”. Esses problemas referem-se, basicamente, à divisão institucional de tarefas e responsabilidades e a falhas de comunicação entre as organizações e a sociedade envolvida direta ou indiretamente na gestão da água.

Feitas essas considerações, conclui-se que a complexidade imposta pela diversidade de usuários e objetivos associados aos usos da água enseja a existência de instrumentos técnicos e legais de planejamento e gestão que viabilizem a efetiva participação da sociedade no processo de busca do equilíbrio entre oferta e demanda, necessário à sustentabilidade na utilização dos recursos hídricos.

Tais instrumentos têm como diretriz geral o atendimento às diversas demandas, gerenciando os possíveis conflitos e respeitando os condicionantes ecológicos dos sistemas hídricos. Por isso, devem levar em conta, além da eficiência econômica, as questões relativas a equidade, risco, qualidade ambiental, bem-estar e justiça social.

Assim, como prova de sua atualidade e pertinência, a Lei Federal n.º 9.433/97 (Brasil, 1997), que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos no Brasil, tem a gestão descentralizada, participativa e integrada dos recursos hídricos como um de seus princípios. A participação pública no processo de tomada de decisões apresenta as importantes vantagens de favorecer a negociação nas situações de conflitos e a busca de soluções de compromisso, bem como de propiciar maior transparência e credibilidade do processo decisório e de auxiliar na conscientização da sociedade. Com isso, desperta-se um senso de co-responsabilidade que fortalece a fiscalização e a cobrança pela implementação das decisões acordadas (Baltar, 2001).



A gestão participativa e integrada dos recursos hídricos também apresenta a vantagem de facilitar a implementação das decisões tomadas. Como reflete Pidd (1996), o processo de construção e tomada de decisão é, muitas vezes, a parte mais fácil da solução do problema. O que é muito mais difícil, e que consome mais tempo, recursos e energia, é conseguir que a decisão seja total e corretamente implementada e, então, garantir a operação continuada do novo sistema. Na maioria dos casos, quando o processo decisório participativo e integrado não foi adequadamente seguido, não há comprometimento de todos os envolvidos para a implementação da decisão. Nesses casos, torna-se necessário um processo de consulta, argumentação e persuasão, que pode ser bastante exaustivo e que pode, inclusive, pôr em risco a própria implementação da decisão.

A participação pública e a abordagem integrada aperfeiçoam o processo decisório e tendem a conduzir à melhor decisão. Nesse aspecto, convém ressaltar que, como bem discutem Gough e Ward (1996), a definição do que vem a ser uma boa decisão é, de fato, um julgamento de valor. Uma boa decisão está relacionada, em diferentes graus, à adoção de um bom processo decisório, o qual pode ser tanto heurístico como formalmente estruturado, e ao bom resultado obtido com a decisão tomada. Deve-se ressaltar, no entanto, que decisões envolvem riscos e, sob essa perspectiva, um bom processo decisório e um bom resultado não obedecem a uma relação determinística. Se um bom processo é implementado e há poucas incertezas envolvidas, então há grande possibilidade de que o resultado final também seja bom. Entretanto, as decisões em que a dimensão ambiental está envolvida normalmente estão sujeitas a consideráveis e variadas incertezas. Além disso, alguns dos resultados somente são observados após o decurso de um longo tempo. Isso faz com que o processo decisório em questões ambientais assuma grande importância para a obtenção de decisões consideradas satisfatórias.

Não se pode negar que existam dificuldades para viabilizar a participação pública nos processos de identificação e formulação de problemas e de discussão e obtenção de soluções de consenso. Essas dificuldades são inerentes ao processo participativo e devem-se, essencialmente, à necessidade de se envolverem diversos usuários, com pontos de vista distintos e capacidade diferenciada de consideração dos aspectos técnicos envolvidos. Isso torna desejável e, às vezes, indispensável, a adoção de mecanismos facilitadores para o tratamento e a transmissão das informações técnicas associadas aos problemas de recursos hídricos, de modo a viabilizar a efetiva participação dos diversos tomadores de decisão.

É nesse contexto que se apresenta a utilidade dos sistemas de apoio à decisão (SAD), entendidos como ferramentas e metodologias, capazes de auxiliar indivíduos ou grupos organizados no processo de formulação, análise e seleção de alternativas para a solução de problemas não-estruturados ou parcialmente estruturados (Porto e Azevedo, 1997). Segundo os mesmos autores, um problema é dito não-estruturado ou semi-estruturado quando:

- o papel dos agentes decisores não é precisamente definido;
- as decisões são tomadas em um contexto mal conhecido ou muito complexo, devido à carência de dados ou conhecimentos específicos e às incertezas envolvidas;
- há dificuldade em se formularem critérios quantitativos.

Ainda segundo Porto e Azevedo (1997), as características dos sistemas de apoio à decisão estão intrinsecamente relacionadas ao nível hierárquico em que a decisão será tomada. Como mencionado anteriormente, as decisões podem se dar em três níveis: estratégico, tático e operacional. O que distingue esses níveis são o grau de incerteza ao qual eles estão sujeitos e o alcance das decisões no tempo. Nesse sentido, o grau de estruturação dos problemas no nível estratégico tende a ser menor, aumenta no nível tático e tende a ser maior no nível operacional.

Assim, um sistema de apoio a decisões estratégicas deve apresentar informações com alto nível de agregação e precisam ter flexibilidade para permitir a análise de várias alternativas e cenários futuros. Como salientam Soncini-Sessa *et al.* (2003), os resultados e produtos de um SAD nesse nível são decisões de planejamento, políticas de gestão e modelos agregados, os quais são dados de entrada para SADs em nível gerencial. Por outro lado, o nível operacional é, geralmente, altamente estruturado, de modo que regras e procedimentos podem ser aplicados, configurando, assim, um sistema de controle.

### **3.1.2 - Reservatórios de usos múltiplos**

Lagos e reservatórios são mananciais superficiais extremamente importantes para o homem, pois possibilitam a acumulação de água nos subperíodos de excesso para posterior uso da água reservada nos subperíodos de escassez, atenuando tanto cheias como estiagens (Lanna, 1997). Permitem, desse modo, a alteração do regime hidrológico, adequando o padrão temporal da disponibilidade de água ao das demandas.

Os lagos e reservatórios são ambientes extremamente frágeis, fadados ao lento e contínuo processo natural de assoreamento, que leva à redução dos seus espelhos d'água e ao seu completo desaparecimento. Esse processo natural pode durar centenas ou milhares de anos, mas é acelerado pelos impactos da intensa atividade antrópica de suas bacias de drenagem, os quais culminam em três alterações principais: contaminação, intensificação do assoreamento e eutrofização (von Sperling, 1993).

A contaminação da água ocorre devido ao recebimento de substâncias tóxicas (metais pesados e componentes orgânicos sintéticos, principalmente) e de agentes patogênicos, que provocam a degradação ecológica do ambiente aquático. O assoreamento é decorrente do carreamento de sedimentos até o corpo d'água, formando zonas de deposição que reduzem o espelho d'água e o volume armazenado, comprometendo, por isso, alguns de seus usos. A eutrofização consiste da fertilização da água devido ao aporte de nutrientes, resultando no crescimento excessivo de organismos vegetais, cujos efeitos na cadeia alimentar afetam, entre outros fatores, a quantidade de oxigênio dissolvido na água.

O múltiplo uso das águas pode ou não ser previsto na etapa de planejamento e projeto de reservatórios, mas, em virtude do efeito dinamizador local e regional normalmente associado a tais empreendimentos, a diversidade de usos da água apresenta-se como realidade a ser enfrentada, preferencialmente de forma articulada (Lanna, 1997). Nesse aspecto, ressalta-se que o gerenciamento de lagos e reservatórios de usos múltiplos requer sólido conhecimento das características hidroclimatológicas e limnológicas do ambiente aquático, de modo que o processo decisório seja confiável e as decisões eficientes (von Sperling, 1993).

Segundo Lanna (1997), os usos possíveis dos recursos hídricos podem ser diferenciados, quanto aos aspectos quantitativos, em: a) consuntivos, que acarretam diminuição da disponibilidade quantitativa, espacial e temporal, devido à retirada da água de sua fonte natural; b) não-consuntivos, que devolvem à fonte praticamente toda água utilizada, podendo inserir alguma variabilidade no padrão temporal de disponibilidade quantitativa; e c) locais, cujo aproveitamento *in situ* da água não resulta em modificação de disponibilidade quantitativa.

De acordo com essa tipologia, as demandas para abastecimento doméstico e industrial e para irrigação são, obviamente, de natureza consuntiva, ao passo que a navegação, a recreação, a criação de peixes e a diluição e depuração de efluentes são não-consuntivos. Exemplos de usos locais são o uso de estuários para fins de aqüicultura e a composição de cenário paisagístico.

Ainda segundo a tipologia proposta por Lanna (1997), a geração de energia hidrelétrica é considerada como uso não-consuntivo, pois retorna ao corpo d'água a água utilizada para a produção de energia. No entanto, como salientam Hora *et al.* (2004), a operação de reservatórios de regularização dos aproveitamentos hidrelétricos impõe, de fato, restrições aos outros usos, pois os usuários de jusante estão sujeitos à vazão liberada pela hidrelétrica e os de montante, principalmente os de natureza não-consuntiva, ao volume deixado no reservatório. Além disso, a operação inadequada ou não regulamentada pode gerar, de forma artificial e aleatória, escassez hídrica para jusante, assim como pode esgotar toda disponibilidade hídrica de montante. Desse modo, em um contexto de gestão integrada e participativa dos recursos hídricos, devido à natureza restritiva da geração de energia elétrica quanto à disponibilidade quantitativa desses recursos, pode-se considerar esse uso como consuntivo, a depender da ótica da análise e da capacidade do reservatório.

Além de compatibilizar o padrão quantitativo das demandas à disponibilidade temporal e espacial de água, deve-se considerar também o padrão qualitativo dessas demandas, variável em função do tipo de uso. No conjunto de usos consuntivos, observa-se, segundo a Resolução Conama nº20/86 (Brasil, 1986), que os padrões de qualidade da água para abastecimento humano são os mais exigentes. Já os requisitos de qualidade da água para os usos industrial e agropastoril e para a produção de hidreletricidade tendem a ser pouco exigentes, exceto para alguns tipos de indústria que requerem padrões de qualidade da água específicos.

Quanto aos usos não-consuntivos, as atividades de recreação são as mais exigentes, pois tão ou mais importantes que a quantidade são as características de qualidade das águas. Lanna (1997) ressalta que mesmo para a apreciação da beleza cênica, sem contato direto, as exigências qualitativas podem ser muito estritas. Os requisitos de qualidade da água para navegação são os menos restritivos.

## 3.2 - MODELOS APLICÁVEIS À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS

### 3.2.1 - Considerações gerais

Os modelos são componentes essenciais dos sistemas de suporte à decisão. Os modelos, nesse contexto, visam, basicamente, ao apoio à tomada de decisão ou à tomada de decisão propriamente dita. Segundo Ensslin *et al.* (2001), os modelos cujo objetivo é a tomada de decisão seguem, usualmente, o paradigma chamado racionalista, enquanto os modelos que buscam auxiliar o processo decisório adotam o paradigma construtivista. Algumas diferenças básicas entre esses paradigmas estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Comparativo entre os paradigmas racionalista e construtivista (adaptado de Ensslin *et al.*, 2001).

	Paradigma Racionalista	Paradigma Construtivista
Forma de atuação	Tomada de Decisão	Apoio à Decisão
Tomada de decisão	momento em que ocorre a escolha da solução ótima	processo evolutivo que pressupõe a interação entre os atores
Decisor	totalmente racional	dotado de sistema próprio de valores
Problema a ser resolvido	problema real	problema construído por cada decisor
Preferências dos decisores	extraídas pelo analista	construídas com o facilitar
Objetivo da modelagem	encontrar a solução ótima	gerar conhecimento para os decisores sobre seu problema
Validade do modelo	quando representa objetivamente a realidade	quando é considerado como ferramenta útil de apoio à decisão

Outra tipologia também utilizada para diferenciar essas duas abordagens é a que distingue os modelos *hard* e os modelos *soft*. Segundo Gough e Ward (1996), a abordagem *hard* baseia-se no princípio de que há dois estados distintos, o atual e o desejado, e que existem diversos caminhos para passar de um ao outro. Nesse sentido, o objetivo dos modelos *hard* é selecionar o melhor caminho, e o critério preferido para essa escolha é o da eficiência

econômica. Convém ressaltar que, segundo Roy (1993), a solução ótima independe do modelo utilizado para obtê-la.

Já a abordagem *soft* é considerada mais apropriada para a concepção de modelos em que os objetivos não sejam claros e o próprio problema seja difícil de ser definido. Nesse caso, busca-se desenvolver um sistema que incorpore as ferramentas dos modelos *hard* onde for apropriado, mas que dê ênfase ao processo de aprendizado. Em outras palavras, prioriza-se a estruturação do problema e a elucidação de seus aspectos complexos em relação à sua resolução. A melhor compreensão do problema dá condições aos decisores para que eles mesmos cheguem à melhor decisão.

Portanto, a principal diferença conceitual entre as abordagens *hard* (ou racionalista) e *soft* (ou construtivista) é que, na primeira, busca-se atingir, da melhor forma possível, um objetivo pré-definido (busca pela efetividade), enquanto, na segunda, valoriza-se o processo seguido para se chegar à decisão consensual mais satisfatória (busca pela eficiência).

Uma definição apropriada à temática do presente trabalho é a de que “um modelo é uma representação externa e explícita de parte da realidade conforme ela é vista pelas pessoas que desejam utilizar esse modelo para entender, modificar, gerenciar e controlar aquela parte da realidade” (Pidd, 1996). Está subentendida a noção de que a modelagem pressupõe, em maior ou menor grau, simplificações da realidade, pois são considerados apenas os aspectos relevantes à representação do sistema para a obtenção do objetivo a que se propõe, que pode ser a compreensão ou a solução do problema, assim como a gestão ou o controle mais efetivos do sistema (Porto e Azevedo, 1997).

Considerando essa definição, os modelos usados na análise de sistemas de recursos hídricos podem ter, normalmente, dois objetivos gerais não excludentes entre si:

- 1) simular o funcionamento de sistemas no tempo ou no espaço, permitindo obter um melhor entendimento do funcionamento em si mesmo, bem como prever respostas em função de alterações nas condições de funcionamento;
- 2) determinar a melhor solução ou a solução mais satisfatória para um determinado problema.

No primeiro caso, têm-se os modelos de simulação, que podem ser desenvolvidos tanto sob o paradigma racionalista como sob o construtivista. No segundo caso, caso o problema possa ser expresso na forma de um único objetivo a ser atendido, sujeito ou não a restrições, adotam-se os modelos de otimização. Esses modelos se apóiam nas diversas técnicas de programação matemática da Pesquisa Operacional tradicional e seguem, usualmente, a abordagem *hard*/racionalista. No caso de haver mais de um critério a ser considerado para se chegar à solução mais satisfatória, utilizam-se os chamados métodos de análise multicritério, que, analogamente aos modelos de simulação, podem ser implementados segundo tanto a lógica racionalista como a construtivista.

### **3.2.2 - Modelos de simulação**

A simulação matemática é, sem dúvida, a técnica mais flexível e utilizada para tratar a representação de sistemas de recursos hídricos. São capazes de indicar a resposta de um sistema existente ou em projeto a um determinado conjunto de informações de entrada, permitindo, assim, o exame das conseqüências de diversos cenários. Conforme Azevedo *et al.* (1997), sua maior vantagem é a de permitir a representação matemática de um sistema com o nível de detalhamento necessário aos objetivos do analista, ressaltando-se que, quanto maior a exigência de detalhamento, maior a complexidade para o desenvolvimento e a aplicação desses modelos.

Existem diversas aplicações de modelos de simulação em problemas de recursos hídricos, como na quantificação de processos do ciclo hidrológico, na análise da qualidade da água em rios, reservatórios e aquíferos subterrâneos, e nos modelos ambientais e meteorológicos, entre outros.

Os modelos de simulação são as ferramentas mais utilizadas nos estudos de planejamento e gestão de reservatórios. Esses modelos permitem uma representação mais detalhada e específica do sistema do que os modelos de otimização. Além disso, permitem explorar a aleatoriedade das aflúências por meio do uso de séries sintéticas de vazões. No entanto, são úteis somente se as políticas operacionais incorporadas na simulação refletirem, de fato, a operação atual ou potencial do sistema. A obtenção de uma política ótima ou satisfatória de operação somente é possível após sucessivas simulações.

### **3.2.3 - Modelos de otimização monocritério**

Conforme mencionado anteriormente, os modelos de otimização monocritério aplicam-se a problemas que podem ser representados por uma única função-objetivo a ser otimizada, sujeita ou não a restrições.

A função-objetivo é geralmente expressa em termos econômicos ou financeiros, refletindo os custos associados ao desvio com relação às metas operacionais ou os benefícios advindos do atendimento das demandas. Alternativamente, pode-se buscar otimizar a quantidade de falhas ou sucessos em atender a demanda. Sendo assim, a aplicabilidade dos modelos de otimização mono-objetivo a problemas de recursos hídricos com múltiplos objetivos, em que devem ser considerados os aspectos ambientais e sociais envolvidos, pressupõe, muitas vezes, a monetarização dos custos e benefícios associados.

Em seguida, apresentam-se as técnicas de otimização de problemas sujeito a restrições, que são classificadas em três grandes grupos: Programação Linear, Programação Não-Linear e Programação Dinâmica. As restrições descrevem as limitações físicas e econômicas do sistema. Segundo Yeh (1985), identificam-se, na operação de reservatórios, restrições relativas à equação da continuidade, aos armazenamentos máximo e mínimo, às vazões liberadas máximas e mínimas, à limitação de equipamentos e às obrigações legais, contratuais e institucionais correspondentes aos vários usos do reservatório.

Há, basicamente, duas formas de se introduzir a aleatoriedade hidrológica nos modelos de otimização aplicados à operação de reservatórios. A primeira consiste em se estimarem as probabilidades de transição entre os estados de vazão, a partir de dados observados. A segunda envolve a geração de séries aleatórias de vazão, as quais são utilizadas como dado de entrada em modelos de otimização determinística.

#### **3.2.3.1 - Programação Linear (PL)**

Na PL, a função-objetivo a ser otimizada e as restrições impostas ao sistema são expressas por equações lineares. É a técnica mais conhecida e utilizada na solução de problemas de otimização em diversas atividades – agricultura, indústria, transportes, setor financeiro,



entre outras. A aplicação mais comum consiste em determinar a alocação ótima de recursos limitados entre atividades competitivas.

Conforme citado por Barbosa (1997a), a partir de um conjunto infinito de soluções possíveis, as restrições do problema definem semi-espacos, cuja interseção delimita a região de soluções factíveis. As soluções ótimas locais recaem sobre os vértices da região factível e a solução ótima global depende do confronto da função-objetivo com as restrições limitantes.

A PL admite que as variáveis de decisão, contínuas, assumam valores fracionários. Há casos, no entanto, cujas variáveis são discretas e assumem valores inteiros, quando se aplica a Programação Inteira.

Para qualquer problema de PL, denominado problema primal, existe uma formulação alternativa, o problema dual, que fornece o mesmo valor para a função-objetivo otimizada. A aplicação da dualidade permite avaliar a relevância de cada restrição do problema para o aumento ou diminuição da função-objetivo (Barbosa, 1997a).

A principal dificuldade em se aplicar a PL a questões de recursos hídricos é a freqüente ocorrência de não-linearidade nas restrições ou na função-objetivo. Uma forma de contornar esse problema consiste na linearização das equações não-lineares, a qual corresponde a um aumento da dimensionalidade do problema. O esforço computacional resultante pode, no entanto, constituir outro problema. Outra alternativa é a adoção de procedimento iterativo até que os resultados obtidos indiquem convergência.

A utilização da PL para a gestão de reservatórios pode utilizar abordagem determinística, quando se considera a vazão afluente ao reservatório igual à vazão média ou à vazão mínima de um período histórico. Essa abordagem pode não dar resultados satisfatórios em face das incertezas inerentes às variáveis hidrológicas.

A PL estocástica é mais adequada à solução de problemas de operação de reservatórios. Aplicada em um processo Markoviano, a partir da vazão afluente e do volume armazenado no tempo (t), permite decidir sobre que vazão deve ser liberada em cada período de tempo (t + 1). Cita-se, ainda, a PL com Probabilidades Restritas, proposta por ReVelle *et al.*

(1969, *apud* Barcellos, 2003), em que as restrições são expressas por funções de distribuição de probabilidades.

### 3.2.3.2 - Programação Não-Linear (PNL)

Aplica-se a PNL para a solução de problemas em que a função-objetivo ou as restrições, ou ambas, são não-lineares. Cirilo (1997) classifica as técnicas de PNL em métodos analíticos e métodos de busca numérica.

Os métodos analíticos clássicos são o Cálculo Diferencial, os Multiplicadores de Lagrange e a Programação Geométrica. Baseiam-se na resolução de sistemas de equações, com o apoio de derivadas.

Os métodos de busca numérica realizam iterações seqüenciais na busca da solução ótima, empregando métodos numéricos nos casos em que não se conhece a função-objetivo ou sua derivação é inviável. Subdividem-se em métodos de busca unidirecional, métodos sem restrições, com busca sem direções ou direcionada a partir de derivadas, e métodos com restrições. Somente os métodos de busca numérica com restrições são aplicáveis à operação de reservatórios de usos múltiplos, dentre os quais podem ser citados o método das aproximações lineares e o método das funções de penalidade.

No método das aproximações lineares, substitui-se o problema original, não-linear, por sucessivos problemas lineares aproximados, os quais são solucionados por PL. O processo é iterativo até a convergência para uma solução viável.

O método das funções de penalidade baseia-se na inserção das restrições do problema na função-objetivo, de modo a transformá-lo de problema com restrições em uma seqüência de problemas sem restrições.

### 3.2.3.3 - Programação Dinâmica (PD)

Aplica-se a PD a problemas que podem ser considerados como processos de decisão seqüencial, ou seja, problemas que podem ser divididos em vários estágios e que requerem

políticas de decisão a cada estágio. O conceito de estágio não se limita a intervalos de tempo, podendo representar locais, atividades, estados, etc.

Barros (1997) elenca diversas vantagens da PD sobre as outras técnicas de otimização, dentre as quais se cita a possibilidade de lidar com funções-objetivo e restrições não-lineares e até mesmo descontínuas. Outro ponto a favor da PD é que, no processo de solução – a busca de ótimos em estágios –, são geradas informações complementares sobre o sistema em estudo, úteis, por exemplo, em problemas estocásticos e em problemas com múltiplos objetivos.

A PD baseia-se na divisão do problema inicial em problemas mais simples, por meio da definição de estágios. A solução do problema é composta das políticas ótimas de cada estágio. Determina-se a política ótima a cada estágio, a qual independe das políticas de decisão adotadas nos estágios anteriores, e percorrem-se todos os estágios para se obter o ótimo global. Essa propriedade, de um determinado estado do sistema incorporar todas as informações associadas às decisões tomadas nos estágios passados, de modo que a política ótima a ser adotada nesse estágio independe do que ocorreu anteriormente, é denominada Propriedade Markoviana.

A solução ótima pode ser obtida em dois sentidos, partindo-se do estágio inicial para o final, em que a PD é dita progressiva, ou vice-versa, e a PD é regressiva. Segundo Barros (1997), aplica-se a PD regressiva à maioria dos problemas de operação de reservatórios em que se parte de uma condição futura definida – por exemplo, reservatório cheio no início do período seco – para se determinar a política ótima de operação para atingir essa meta. A PD progressiva pode ser empregada para análise de regras operativas em tempo real – conhecido o armazenamento atual, pode-se verificar o comportamento do sistema em face de diferentes políticas operacionais.

A PD pode ser determinística (PDD) ou estocástica (PDE). A PDD pressupõe que os eventos futuros são conhecidos. Por exemplo, ao considerar os eventos hidrológicos como fenômenos cíclicos, pode-se associar a vazão de operação ao armazenamento do reservatório. No entanto, sabe-se que os fenômenos hidrológicos são estocásticos, e a não-consideração dessa característica leva a aproximações que, muitas vezes, podem não

ocorrer. Por isso, a PDE, que incorpora a aleatoriedade dos eventos naturais, é mais adequada à otimização da operação de reservatórios.

Na PDE, é obrigatório o sentido regressivo de percurso dos estágios de decisão, devido à necessidade de se estimarem as probabilidades condicionais associadas à ocorrência dos eventos hidrológicos.

Pode-se concluir que os métodos de otimização monocritério são aplicados a problemas razoavelmente estruturados, os quais, quando não são bem conhecidos, passam por um processo de simplificação reducionista que permite sua representação em termos quantitativos, usualmente monetários. É óbvio que, nessa representação do problema, estão implícitos valores e critérios de análise, os quais se pressupõe que sejam conhecidos e aceitos pelos tomadores de decisão. No entanto, pelos motivos expostos, esses métodos não são adequados para tratar de problemas complexos, cuja representação quantitativa é inviabilizada pela necessidade de se levarem diversos valores e critérios subjetivos considerados relevantes pelos envolvidos no processo decisório. Nesses casos, adotam-se os modelos multicritério, os quais são discutidos no item seguinte.

### **3.2.4 - Modelos multicritério**

Conforme enfatizado anteriormente, muitos dos problemas relacionados à gestão de recursos hídricos caracterizam-se pela ocorrência de situações conflitantes, decorrentes das limitações de recursos naturais ou financeiros e da existência de múltiplos usuários e de múltiplos objetivos a serem atingidos, além da eficiência econômica.

A complexidade dos problemas decisórios assim apresentados faz das técnicas de análise multicritério as mais apropriadas para esses casos. Dentre as vantagens desse tipo de abordagem, citam-se as seguintes (Barbosa, 1997b):

- permite organizar melhor as informações e explicitar o papel de cada decisor nas etapas do processo decisório;
- evidencia os conflitos entre objetivos, bem como o nível de compromisso assumido por cada decisor em prol da solução mais satisfatória;
- trata cada critério na unidade de mensuração mais adequada, eliminando a distorção introduzida pela conversão das avaliações em uma única unidade (normalmente

monetária) e permitindo considerar custos implícitos que, normalmente, não seriam ponderados pelas análises de eficiência econômica.

Como desvantagens desse tipo de análise, podem-se citar, de um lado, a necessidade de um grande número de informações para cada alternativa avaliada, e, de outro, a possibilidade de o resultado do processo de seleção não privilegiar a eficiência econômica, o que depende dos critérios considerados, da aplicabilidade desse tipo de análise à problemática em questão e dos agentes participantes da decisão, que podem conferir certa ineficiência ao processo.

Alguns conceitos são importantes na estruturação de problemas a serem tratados por análise multicritério. Os *atores* são indivíduos ou grupos de indivíduos, perfeitamente identificáveis, que participam, direta ou indiretamente, do processo decisório. Dentre os atores que têm participação ativa no processo, estão incluídos os *decisores* ou *tomadores de decisão*, aos quais foi formal ou moralmente delegado o poder de decisão. Os *objetivos* representam estados desejados do sistema em consideração, para os quais um ou mais agentes decisores se empenham. Os *atributos* ou *critérios* expressam qualidade mensurável de julgamento, cujo valor, cardinal ou ordinal, reflete o grau de alcance de um objetivo. *Regras de decisão* são conjuntos de regras que facilitam o ordenamento das alternativas, conceito que se associa ao de *meta*, que é o valor de um dado atributo considerado como seu padrão de aceitabilidade.

A abordagem multicritério, mais flexível e abrangente, não se limita a somente uma função a ser otimizada, considerando, sim, um conjunto de objetivos a serem atingidos. Portanto, não existe um único ótimo, mas um conjunto de ótimos que satisfazem em níveis diferentes os objetivos considerados. Em substituição ao conceito de solução ótima, introduz-se o conceito de *soluções não-dominadas*, *não-inferiores* ou *dominantes*, que são as soluções nas quais só é possível aumentar a satisfação de um objetivo se houver correspondente piora na satisfação de outro. Institui-se, dessa forma, o conceito de compromisso, relações de troca ou *trade-offs* entre os usos, princípio norteador das decisões em problemas desse tipo. Quando há possibilidade de melhora de dois objetivos, as soluções são ditas *dominadas* ou *inferiores*.

Existem diversas chaves de classificação das técnicas de análise multicritério, idealizadas com o intuito de facilitar a escolha da metodologia mais adequada ao tratamento de determinado tipo problema, dentre as muitas técnicas existentes.

MacCrimmon (1973) dividiu os métodos multicritério em quatro categorias principais, em função do princípio básico utilizado na análise do problema: a) Métodos de Ponderação, b) Métodos de Eliminação Sequencial, c) Métodos de Programação Matemática e d) Métodos de Proximidade Espacial.

Cohon e Marks (1975) organizaram as técnicas em três grupos, de acordo com o papel do decisor no processo de análise e escolha das alternativas: a) técnicas de geração de soluções não-dominadas, sem considerar as preferências dos decisores; b) técnicas de ordenamento de alternativas, com articulação prévia de preferências dos decisores; e c) técnicas com articulação progressiva das preferências, sequenciais ou iterativas.

Goicoechea *et al.* (1982) subdividiram o grupo das técnicas de ordenamento com articulação prévia de preferências em dois grupos, um de métodos adequados a alternativas contínuas e outro de métodos apropriados a problemas com número finito de soluções (alternativas discretas).

Posteriormente, Vincke *et al.* (1992) propuseram outra classificação dos métodos, segundo a forma como é feito o ordenamento das alternativas: a) métodos com critério único de classificação, sem incomparabilidade, que agregam diferentes pontos de vista em uma única função-objetivo a ser otimizada; b) métodos de desclassificação, que incorporam relações de preferência, veto e incomparabilidade, não necessariamente transitivas; e c) métodos interativos, que alternam etapas de cálculo e etapas de diálogo com os decisores, aos quais, por sua vez, é permitido intervir tanto na definição do problema como no processo utilizado para solucioná-lo.

Ensslin *et al.* (2001) adota a classificação proposta por Roy (1996), similar à última mencionada, baseada em três abordagens: abordagem de critério único de síntese, abordagem da subordinação de síntese e abordagem do julgamento local interativo. Essas abordagens serão discutidas a seguir.

Na discussão dos itens seguintes, pode-se observar que cada abordagem possui suas vantagens e desvantagens, e a escolha por uma ou outra se dá com base em diversos fatores, relacionados às características específicas do problema e à própria experiência do analista facilitador. Ensslin *et al.* (2001) elencam uma série de questões que devem ser avaliadas para a escolha da abordagem de apoio à decisão mais apropriada. Em termos sucintos, essa escolha está vinculada aos atores envolvidos no processo decisório, aos tipos e alcance das ações possíveis de serem adotadas, à forma como essas alternativas de ações devem ser avaliadas, aos objetivos que devem ser considerados na avaliação e aos resultados e recomendações que se espera obter com a aplicação do sistema de apoio à decisão.

#### 3.2.4.1 - Modelos baseados na abordagem de critério único de síntese

Exemplos de métodos baseados na abordagem de critério único de síntese (ou de classificação) são o Processo Hierárquico Analítico (Saaty, 1990) e a Teoria de Utilidade Multiatributo.

No método da Teoria de Utilidade Multiatributo, cada critério (ou objetivo) é transformado em uma função de utilidade (ou função de valor), que representa matematicamente a estrutura de preferência do decisor, ou seja, o quanto uma dada alternativa fornece de utilidade para os decisores, com relação ao aspecto decisório medido naquele critério. Essa função é normalmente representada por uma variável normalizada entre 0 e 1, em que o valor 0 corresponde à menor utilidade e o valor 1, à maior utilidade.

Os valores de utilidade  $v_i$  associados a cada ação  $x$  nos diversos  $i$  critérios são agregados por meio das taxas de substituição desses critérios, ou seja, dos pesos  $w_i$  indicativos da importância relativa entre eles. Desse modo, a utilidade global  $V(x)$  de cada ação  $x$  é fornecida pela função de agregação aditiva apresentada na Equação 3.1, sendo também possível a agregação multiplicativa. A comparação das utilidades totais das alternativas permite a avaliação explícita e a hierarquização das mesmas.

$$V(x) = w_1 \cdot v_1(x) + w_2 \cdot v_2(x) + \dots + w_i \cdot v_i(x) \quad (3.1)$$

Aspectos críticos nesse método são a determinação das funções de utilidade para cada critério e, em especial, a determinação dos pesos dos critérios, pois os resultados do modelo podem ser bastante diferentes com pequenas modificações nos valores desses parâmetros.

No método do Processo Analítico Hierárquico, as relações de preferência entre as alternativas, no contexto de um objetivo, fazem-se por comparações aos pares. As importâncias entre objetivos também são estabelecidas aos pares e utilizando os mesmos procedimentos de avaliação e de cálculo.

Como preconizado pelo método, a escala utilizada pelo usuário para fazer as comparações aos pares tem, no mínimo, cinco níveis, conforme apresentado na Tabela 3.2. Assim, se um decisor considera que “a preferência por A sobre B é muito forte”, numericamente isso será convertido em “a relação de preferência de A sobre B é de 7 para 1, ou 7/1”.

Tabela 3.2 - Escala de valores adotados no Processo Hierárquico Analítico para a comparação pareada entre objetivos e alternativas (Braga e Gobetti, 1997, adaptado).

<b>Intensidade de importância</b>	<b>Definição</b>
1	Mesma importância
3	Pequena preferência
5	Significativa preferência
7	Preferência muito forte
9	Preferência absoluta
2, 4, 6, 8	Valores intermediários

As comparações feitas pelo decisor são postas em forma de matriz quadrada, de modo que operações matriciais permitem determinar a importância relativa de cada objetivo considerado na análise e, do mesmo modo, a prioridade relativa de cada alternativa, o que permite hierarquizá-las.

Como o decisor estabelece suas avaliações aos pares, ele pode não ter uma visão do conjunto, de modo que inconsistências entre preferências podem ocorrer. Apesar da possibilidade de inconsistências, a comparação aos pares apresenta as vantagens de serem



mais precisas, pois a mente humana tem dificuldades em comparar simultaneamente diversas alternativas, e, também, de introduzirem redundâncias de avaliações, que possibilitam aprimorar o processo.

#### 3.2.4.2 - Modelos baseados na abordagem de subordinação ou de desclassificação

A abordagem de subordinação (ou de desclassificação) surge em contraposição à de critério único. Para evitar a rigidez matemática das funções de utilidade, é introduzido o conceito de limiar para possibilitar ao decisor a formalização de suas preferências, tendo em vista as incertezas e imprecisões do problema.

Os limiares viabilizam a identificação de relações de subordinação entre as alternativas, de modo que, se há argumentos suficientes para dizer que uma alternativa  $a$  é pelo menos tão boa quanto uma alternativa  $b$ , e não há argumentos suficientes para refutar tal julgamento, então  $a$  subordina  $b$ . Faz-se uma comparação par-a-par dos desempenhos de cada alternativa sob cada um dos critérios e, por meio da análise das relações de subordinação entre elas, identifica-se a ordem de preferência.

Exemplos de métodos de desclassificação são os métodos da família Electre (Electre I, II, III, IV e TRI) e os métodos Promethee (I e II), ambos de articulação prévia das preferências dos decisores e aplicáveis a problemas com número finito de alternativas (soluções discretas).

O Electre I é aplicável a problemas em que os atributos são valorados qualitativamente. Sua filosofia consiste em separar do conjunto total das alternativas as que são preferidas na maioria dos critérios de avaliação e que não causam nível inaceitável de descontentamento nos outros critérios. Associam-se pesos, determinados pelo juízo de valor dos decisores, aos critérios. A comparação entre as alternativas, duas a duas, é feita a partir de relações de preferência, não necessariamente transitivas, para as quais são essenciais os conceitos de concordância e discordância. A concordância entre duas alternativas representa a disposição do decisor em escolher uma alternativa em relação à outra. O conceito de discordância é complementar ao de concordância, representando o nível de desconforto causado pela escolha de uma alternativa sobre a outra (Braga e Gobetti, 1997).

O Electre II é uma extensão do Electre I. Utiliza os gráficos fornecidos pelo Electre I, representando as relações de preferência forte e fraca entre alternativas, para ordená-las progressiva e regressivamente. A média das classificações resultantes corresponde à classificação final das alternativas.

O Electre III classifica alternativas cujos atributos são valorados quantitativamente, para solução de um problema monodecisor. No caso de problemas com mais de um decisor, aplica-se o método para cada decisor, com seu respectivo conjunto de pesos para os critérios. O método considera, além das relações de preferência fraca e de preferência estrita, as relações de indiferença e de incomparabilidade, o que permite analisar situações em que nem todas as alternativas sejam comparáveis entre si devido a consideráveis diferenças de pontos de vista. Primeiramente, comparam-se as alternativas duas a duas, atribuindo índices de concordância a cada par de alternativas. Atribuem-se, também, índices de discordância, que indicam em que medida um dado critério refuta a asserção de que uma alternativa é tão boa quanto a outra. A combinação desses dois índices resulta em índices de credibilidade, utilizados para o ordenamento completo das alternativas.

O Electre IV tem estrutura mais simples que os demais métodos da família. Utiliza somente os limites de preferência estrita e de indiferença, não existindo as noções de concordância e discordância. É bastante útil em casos em que há dificuldade na ponderação dos critérios ou mesmo quando os jogos de ponderação são antagônicos (Generino e Cordeiro Netto, 1999).

No Electre TRI, é feito um enquadramento das alternativas em categorias previamente definidas, cada uma com limites inferior e superior dados por ações de referência. Não há comparação entre alternativas, mas sim a alocação dessas nas diferentes categorias, por meio da comparação de cada alternativa às ações de referência.

Já nos métodos Promethee I e II, a comparação entre alternativas, duas a duas, é feita por relações de preferência e indiferença, obtidas por meio da escolha, dentre seis tipos diferentes de função, e aplicação de uma função de preferência a cada critério.

Essa função indica a intensidade da preferência de uma alternativa sobre a outra, com relação a um dado critério, com base no desvio entre os valores da função. Não se gradua o conceito de preferência em forte e fraco.

Calcula-se o índice de preferência global de uma alternativa sobre outra, ponderando-se as funções de preferência obtidas para os critérios por um conjunto de pesos atribuídos pelo decisor. Calculam-se, também, os chamados fluxos de importância positivo e negativo para cada alternativa, que representam, respectivamente, o quanto cada alternativa domina ou é dominada pelas demais. A classificação das alternativas, com base nos valores dos fluxos de importância, é parcial no Promethee I e total no Promethee II.

#### 3.2.4.3 - Modelos baseados na abordagem do julgamento local interativo

A abordagem do julgamento local interativo, ao contrário das outras duas, não realiza uma agregação dos desempenhos de cada alternativa em cada um dos critérios para determinar o respectivo desempenho global e, aí, permitir a hierarquização das alternativas. No presente caso, busca-se encontrar a solução mais conveniente no espaço de soluções viáveis, alternando-se as etapas de cálculo e de interação com os decisores. Cada solução encontrada é apresentada aos decisores, que fornecem mais informações no sentido de informar a direção de otimização preferida, e assim, sucessivamente, até o atingimento de uma solução considerada satisfatória por todos.

O exemplo mais conhecido de método de julgamento local interativo é a Programação de Compromisso, aplicável tanto a problemas contínuos como discretos. Esse método se baseia na medida de proximidade das alternativas com relação à solução considerada ideal. Na maioria dos casos, a solução ideal não é factível, uma vez que é difícil atender a todos os objetivos, mas serve para avaliar o desempenho das soluções alcançáveis.

Na aplicação da Programação de Compromisso, o decisor deve indicar os pesos dos objetivos e o parâmetro  $p$ , que reflete a importância dos desvios em relação ao ideal. Se  $p = 1$ , todos os desvios têm a mesma importância e são considerados igualmente. Quando  $p = 2$ , cada desvio é ponderado proporcionalmente à sua magnitude, e, à medida que  $p$  aumenta, o maior desvio recebe maior importância. No limite, quando  $p = \infty$ , o desvio global da alternativa é determinado pelo desvio do pior critério.

A Programação de Compromisso é um método iterativo, pois os pesos dos objetivos e o parâmetro  $p$  podem ser variados (e, dessa forma, as soluções ideais) até que o decisor identifique a solução mais satisfatória.

Os métodos interativos apresentam a vantagem de permitir que os decisores conheçam bem a estrutura do problema, devido ao grande envolvimento exigido dos decisores no processo de solução. Podem, no entanto, após algumas interações, gerar insatisfação dos decisores com respeito ao procedimento utilizado ou à demora em se chegar a alguma conclusão satisfatória e, conseqüentemente, levar a situações em que não se atinja a solução de compromisso. Além disso, é difícil, senão impossível, permitir a visualização simultânea do desempenho de muitos critérios.

### **3.3 - ASPECTOS ESPECÍFICOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DE LAGOS – EUTROFIZAÇÃO DE LAGOS TROPICAIS**

Dada a natureza do problema apresentado, discutem-se, brevemente, aspectos relativos à eutrofização de reservatórios, com ênfase no modelo desenvolvido pelo Cepis – Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (Salas e Martino, 1990) para estimativa do nível trófico de lagos tropicais.

#### **3.3.1 - Eutrofização de lagos e reservatórios tropicais**

A eutrofização de rios, lagos e reservatórios consiste no crescimento da atividade biológica, devido a alterações dos ciclos geoquímicos de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo. Esse incremento se manifesta, primeiramente, no aumento da produtividade primária, com o crescimento exacerbado de algas microscópicas (fitoplâncton) ou plantas aquáticas (macrófitas), que leva à redução da transparência da água e ao acúmulo de matéria orgânica no sedimento, com conseqüente déficit de oxigênio nas camadas profundas. Essas alterações se refletem em todos os níveis da cadeia alimentar do ecossistema, alterando o equilíbrio ecológico e interferindo nos usos desejados da água.

Como visto anteriormente, a eutrofização advém de causas naturais (diminuição da bacia hidráulica devido ao assoreamento e ao decréscimo das vazões afluentes, por exemplo),

que se caracterizam pela ação bastante lenta, e dos efeitos da atividade antrópica (desflorestamento, urbanização, industrialização e intensificação da agricultura), que são mais intensos e aceleram significativamente a evolução do processo de degradação.

A eutrofização é condição particularmente crítica nos corpos lênticos, pois o alto tempo de residência hidráulica favorece o crescimento dos vegetais aquáticos. O excesso de algas na superfície das águas diminui a transparência e pode causar aspecto e odor desagradáveis, prejudicando os usos recreacionais. A depender das espécies de algas, pode, também, haver liberação de toxinas na água, comprometendo a utilização para abastecimento. Já as macrófitas comprometem a navegabilidade, interferem nos processos de aeração e evaporação e servem de meio de desenvolvimento de parasitas, insetos e vetores de doenças.

Conforme descreve von Sperling (1994), esses vegetais geralmente apresentam reduzido ciclo de vida, e sua morte e subsequente sedimentação elevam a concentração de matéria orgânica no fundo do corpo hídrico, cuja estabilização pode exaurir completamente o oxigênio dissolvido disponível nas camadas profundas, principalmente nos períodos de estratificação. Atinge-se, assim, uma condição de anaerobiose.

A anaerobiose provoca a solubilização de diversos compostos químicos, dentre eles o fosfato, constituindo uma fonte interna de nutrientes que agrava ainda mais o quadro de fertilização do corpo d'água. Quanto a esse aspecto, é importante notar que uma grande fertilização por longo período de tempo pode fazer com que o mecanismo de ciclagem interna se torne independente das variações externas e suficiente para a manutenção dos níveis de produtividade primária em patamares elevados. Quando se atinge tal estágio, as medidas de remediação são extremamente complexas e onerosas.

Além disso, condições anaeróbias favorecem a predominância de compostos reduzidos como o gás sulfídrico, o metano e a amônia, bem como a liberação de íons de ferro dos sedimentos, que trazem grandes problemas à fauna aquática e à utilização da água para fins de abastecimento. O enriquecimento com fósforo, tanto por aporte externo como interno, reduz a relação entre nitrogênio e fósforo, favorecendo o crescimento de cianobactérias fixadoras de nitrogênio, que conferem sabor e odor à água e podem liberar toxinas, o que também prejudica o uso da água para abastecimento.

Os efeitos sobre as comunidades biológicas variam segundo os grupos de organismos e as zonas por eles ocupadas. As comunidades de produtores e consumidores das zonas litorânea e pelágica geralmente têm sua biomassa aumentada, enquanto os organismos das zonas mais profundas são prejudicados pelas condições de anoxia que se estabelecem. Os efeitos na cadeia alimentar favorecem as espécies mais resistentes às condições de degradação da qualidade da água, levando à diminuição da biodiversidade. Um bom exemplo dessa situação é a resposta das comunidades de peixes, com ocupantes de níveis tróficos superiores, ao enriquecimento nutricional, em que o aumento geral da produtividade pesqueira encontra-se frequentemente associado ao favorecimento de espécies menos nobres. Em condições de hipereutrofização, o agravamento da deterioração da qualidade da água passa a limitar e desfavorecer a produção pesqueira, ocorrendo, com frequência, mortandades maciças de peixes (Barica, 1980, *apud* Pereira, 2004).

Segundo Tundisi (2001), a condição de eutrofização dos corpos d'água é conseqüência de interações bastante complexas entre fatores físicos, químicos e biológicos. Os fatores físicos relacionam-se à interação entre aspectos hidráulicos e hidrológicos do corpo d'água, sendo de maior relevância para a limnologia o tamanho, a profundidade, o tempo de renovação da água e os padrões de estratificação e mistura.

Geralmente, lagos rasos favorecem a ciclagem interna de nutrientes, devido à maior proximidade dos depósitos de nutrientes contidos nos sedimentos de fundo à camada que recebe maior intensidade de luz, levando a uma maior produtividade primária. A taxa de renovação da água (tempo de residência hidráulica) também influencia a resposta do corpo d'água ao aporte de nutrientes, pois altos tempos de detenção favorecem a assimilação dos nutrientes pelos organismos, enquanto pulsos rápidos de descarga para jusante reduzem o tempo em que os nutrientes estão disponíveis para essa assimilação, contribuindo para um menor aumento da biomassa. Por fim, os padrões de estratificação e mistura determinam a movimentação horizontal e vertical das massas d'água, influenciando na distribuição espacial dos nutrientes dentro do ecossistema lacustre.

As condições químicas observadas em lagos e reservatórios resultam dos processos biogeoquímicos e hidrológicos de seus mananciais e dos processos ecológicos e químicos em suas águas e sedimentos. As interações entre os níveis tróficos da comunidade biótica também têm a capacidade de modular os impactos da adição de nutrientes. Por exemplo,

caso ocorra redução dos peixes piscívoros, em função de condições limnológicas adversas ou da pesca intensiva, aumentam os peixes planctívoros, predadores do zooplâncton, diminuindo a pressão sobre o fitoplâncton, cujo florescimento, então, é mais intenso.

O crescimento e a reprodução dos vegetais aquáticos depende, essencialmente, da disponibilidade de luz e de nutrientes. O desenvolvimento das plantas aquáticas vasculares submersas, que normalmente têm raízes e retiram nutrientes dos sedimentos, é limitado pela turbidez das águas ou pelo sombreamento por plantas aquáticas flutuantes. Já a abundância e a composição das espécies de plantas flutuantes (fitoplâncton) variam conforme a relação de nutrientes disponíveis e as condições de luz sob as águas. Quanto a esse aspecto, cabe ressaltar que algumas espécies de cianobactérias podem regular sua flutuabilidade e se tornam mais comuns à medida que aumenta a turbidez. Segundo Salas e Martino (1990), o nutriente limitante – aquele que limita o crescimento da vegetação aquática por estar presente em quantidade menor que a necessária –, na maior parte dos lagos e reservatórios tropicais da América Latina, incluindo o lago Paranoá, é o fósforo.

### **3.3.2 - Modelos de estimativa do nível trófico de lagos e reservatórios: o modelo Cepis**

Diante da importância dos efeitos da eutrofização em lagos e reservatórios, inúmeros estudos têm sido realizados, ao longo das últimas décadas, com vistas a desenvolver modelos simplificados para avaliar o grau de fertilização desses ecossistemas. Os lagos e reservatórios podem ser classificados, em função da concentração de nutrientes na água ou das manifestações ecológicas decorrentes, em ultra-oligotróficos, oligotróficos, mesotróficos, eutrófico e hipereutrófico. Von Sperling (1994) faz uma retrospectiva da evolução desses estudos, ressaltando que a classificação trófica absoluta de um corpo d'água é virtualmente impossível, tendo em vista que ocorrem variações regionais nos intervalos dos parâmetros considerados e que os lagos podem ter classificações diferentes dependendo do critério utilizado. Além disso, há corpos d'água que, em função do formato da bacia hidráulica e do regime de vazão, experimentam diferenças longitudinais (até mesmo verticais, durante um mesmo dia) no grau de eutrofização.

O autor supracitado também assinala que a maioria dos modelos de classificação trófica foi obtida a partir de observações feitas em lagos de clima temperado, não sendo apropriada sua aplicação a lagos tropicais. As diferenças climáticas entre as regiões temperadas e

tropicais alteram as respostas dos organismos aquáticos. Por exemplo, em função da maior temperatura da água, o metabolismo dos organismos é mais acelerado, o que aumenta a capacidade de assimilação de nutrientes. Por esse motivo, também é maior a taxa de decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, a taxa de consumo do oxigênio dissolvido no fundo. À maior temperatura da água corresponde uma menor viscosidade, levando a maiores taxas de sedimentação de organismos e nutrientes particulados. Para compensar as grandes perdas por sedimentação e predação, são necessárias maiores taxas de crescimento, resultando em menos biomassa formada por unidade de nutriente.

No que se refere à estimativa da concentração de fósforo na água de lagos e reservatórios, a abordagem empírica prevalece em relação à modelagem física, devido à complexidade e à conseqüente dificuldade de representação dos fenômenos envolvidos. É de R.A. Vollenweider (1976, *apud* Salas e Martino, 1990) a formulação da relação empírica mais utilizada para estimar a concentração de fósforo na água represada, a partir da carga afluente anual de fósforo, do tempo de detenção hidráulica e da profundidade média (Equação 3.2). Em outros termos, o modelo de Vollenweider faz uma estimativa do balanço de massa do fósforo total, considerando o lago completamente misturado e em condições de equilíbrio.

$$[P] = \frac{L(P)}{\bar{Z} \cdot \left( \frac{1}{Tr} + Ks \right)} \quad (3.2)$$

em que

[P]: concentração de fósforo na água do reservatório ( $[M \cdot V^{-1}]$ );

L(P): aporte de fósforo ao reservatório, por unidade de área do mesmo ( $[ML^{-2}T^{-1}]$ );

$\bar{Z}$  é a profundidade média do reservatório ( $[L]$ );

Tr é o tempo de residência hidráulica do reservatório ( $[T]$ );

Ks é o coeficiente de perda de fósforo por sedimentação ( $[T^{-1}]$ ).

O coeficiente Ks não é conhecido nem pode ser medido de forma direta, podendo ser estimado a partir de informações sobre as entradas e saídas do lago. Vollenweider, a partir de dados de lagos temperados, chegou à seguinte relação empírica para Ks (Equação 3.3):



$$K_s = \frac{1}{\sqrt{Tr}} \quad (3.3)$$

Castagnino (1982) estimou que o  $K_s$  de lagos tropicais seria 2,5 vezes maior que o de lagos temperados, em função da maior perda de fósforo por sedimentação e da maior taxa de crescimento de fitoplâncton, devido à maior temperatura da água.

O Cepis (Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental) desenvolveu estudos para a avaliação da eutrofização de lagos quentes tropicais, utilizando dados experimentais de lagos e reservatórios na América Latina e no Caribe, incluindo o lago Paranoá, objeto de estudo do presente trabalho (Salas e Martino, 1990). Chegou-se a um  $K_s$  para lagos tropicais igual ao dobro do  $K_s$  de lagos temperados, resultado próximo ao de Castagnino. Como resultado desses estudos, foi desenvolvido um modelo simplificado para estimativa da concentração de fósforo no corpo d'água, por meio de análise de regressão múltipla em função das variáveis  $L(P)$ ,  $Tr$  e  $\bar{Z}$ , o qual é apresentado na Equação 3.4.

$$P = \frac{0,290 \cdot L(P)^{0,891} \cdot Tr^{0,676}}{\bar{Z}^{0,934}} \quad (3.4)$$

Ressalta-se que, tanto o modelo original de Vollenweider como suas adaptações subseqüentes, incluindo a do Cepis, não incorporam os efeitos das macrófitas aquáticas sobre o processo de eutrofização. Sabe-se que as macrófitas podem funcionar como verdadeiras “bombas” de fósforo, pois sua decomposição libera, periodicamente, concentrações apreciáveis desse nutriente, além de aumentar a carga orgânica (Salas e Martino, 1990). A colheita dessas plantas reduz a concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos para níveis muito baixos, além de gerar matéria orgânica para outros propósitos, mas é tarefa difícil de ser feita em grande escala.

O Cepis também desenvolveu um sistema de classificação de estado trófico para lagos quentes tropicais, a partir da distribuição de probabilidades para cada uma das categorias, em função da concentração de fósforo total e de clorofila-a. A Figura 3.1 apresenta a distribuição de probabilidades em função da concentração de fósforo total.

Salas e Martino (1990) assinalam que o emprego de modelos empíricos simplificados, apesar da imprecisão associada, permite estimar os impactos na qualidade da água advindos de alterações nas características das atividades desenvolvidas na bacia de drenagem. A classificação trófica proposta permite estabelecer a probabilidade de um lago se encontrar em um determinado estado trófico. Assim, pode-se propor medidas de controle mais ou menos restritivas e estabelecer diretrizes para a gestão do recurso hídrico em função dos usos desejados para o mesmo.

Quanto a esse aspecto, ressalta-se que há usos mais restritivos que outros, no que se refere ao estado trófico das águas. A Tabela 3.3 apresenta os estados tróficos desejáveis e toleráveis pelos diferentes usos que se podem fazer de um corpo d'água.

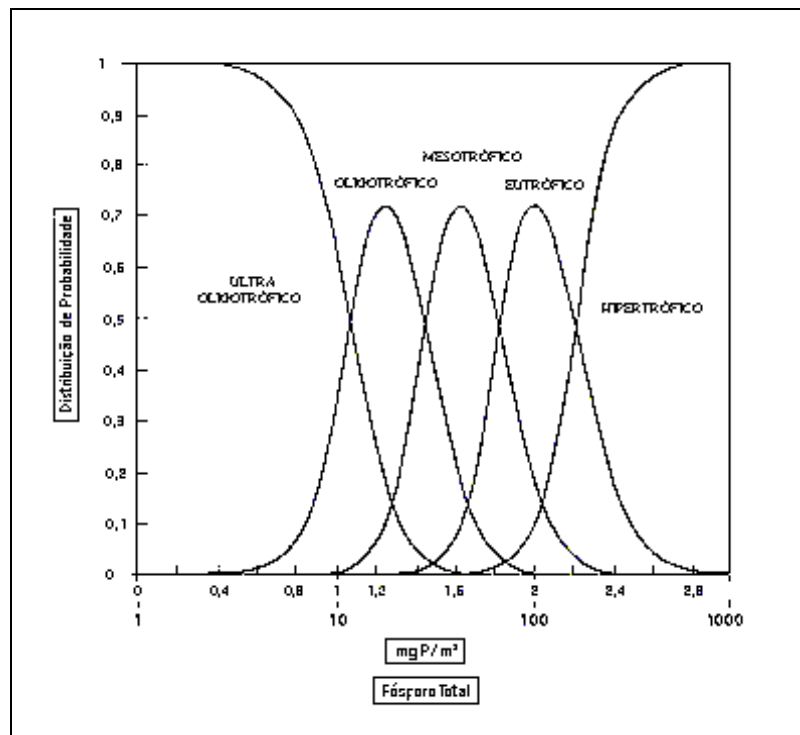


Figura 3.1 – Distribuição de probabilidade de nível trófico de lagos quentes tropicais, a partir do fósforo total (Salas e Martino, 1990, adaptado de Vollenweider e Kerekes, 1981).

Tabela 3.3 – Vinculação entre os usos da água e os graus de trofia em um corpo d'água (von Sperling, 1996, adaptado).

Uso	Classe de trofia				
	Oligotrófico	Mesotrófico	Meso-eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Abastecimento de água potável	Desejável	Tolerável			
Recreação de contato primário		Desejável	Tolerável		
Recreação de contato secundário		Desejável		Tolerável	
Paisagismo			Tolerável		
Criação de peixes sensíveis		Desejável	Tolerável		
Criação de peixes resistentes				Tolerável	
Irrigação					Tolerável
Produção de energia					Tolerável

## **4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No primeiro tópico, apresenta-se a revisão bibliográfica realizada sobre a aplicação de modelos de apoio à gestão de reservatórios com múltiplos usos. Em função da natureza do trabalho ora proposto, relatam-se, também, experiências de operação de reservatórios com consideração explícita de aspectos de qualidade da água.

### **4.1 - MODELOS APLICADOS À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS**

A gestão de recursos hídricos é área científica caracterizada por problemas e desafios, em virtude da grande quantidade de variáveis envolvidas, da dinâmica não-linear dos processos e da natureza estocástica das afluências. A complexidade aumenta quando o objetivo do gerenciamento é associar os benefícios econômicos proporcionados pela operação dos sistemas hídricos, que, freqüentemente, competem ou conflitam entre si, à redução de riscos e à proteção ambiental.

Os problemas referentes ao planejamento e ao gerenciamento de reservatórios de usos múltiplos têm sido objeto de extensiva pesquisa. Grande número de modelos matemáticos baseados em técnicas de análise de sistemas têm sido propostos nas últimas décadas, oferecendo diversas alternativas para a solução desses problemas, incluindo modelos de simulação, modelos de otimização e modelos multicritério.

Segundo Yeh (1985), a escolha do modelo a ser aplicado à gestão de reservatórios depende das características específicas do sistema em estudo, da disponibilidade de dados e dos objetivos e restrições estabelecidos. Além disso, conforme discutido anteriormente, a escolha do modelo depende do tipo de decisão que o modelo deve apoiar, pois a gestão de reservatórios envolve duas dimensões fundamentalmente diferentes, o planejamento de reservatórios e a operação de reservatórios.

Há diversos exemplos de aplicações de técnicas de otimização da operação de reservatórios de usos múltiplos. Devido ao seu aspecto estocástico, os métodos determinísticos falham na determinação das soluções ótimas, na medida em que não permitem estimar a confiabilidade dos resultados obtidos. Em função da natureza seqüencial do processo

decisório, um dos métodos mais utilizados é a Programação Dinâmica Estocástica (PDE), eventualmente adaptada ou associada a outro método para tratar múltiplos objetivos, por um lado, e a chamada “praga da dimensionalidade”, de outro. Na Tabela 4.1, apresentam-se algumas referências de aplicação da PD a essa categoria de problemas de recursos hídricos.

Referências a outras técnicas são comparativamente menos frequentes. Citam-se, como exemplos, os trabalhos de Soncini-Sessa *et al.* (1990), de Johnson *et al.* (1991), de Oliveira e Loucks (1997), de Cai *et al.* (2001) e de Koutsoyiannis *et al.* (2002).

Soncini-Sessa *et al.* (1990) aplicaram metodologia desenvolvida por Orlovski *et al.* (1983, *apud* Soncini-Sessa *et al.*, 1990) para derivar políticas operativas baseadas numa abordagem de aversão ao risco para o reservatório El Carrizal/Argentina, utilizado para abastecimento de água, irrigação e controle de cheias. A metodologia garante desempenho satisfatório do sistema quando submetido a eventos hidrológicos extremos. Sua principal vantagem é a de dispensar a descrição estocástica das incertezas associadas às afluições futuras. Em vez disso, as políticas operativas são obtidas para seqüências de afluições consideradas representativas das condições mais críticas do sistema.

Johnson *et al.* (1991) desenvolveram um modelo de simulação baseado em regras heurísticas com o objetivo de definir a política operativa do sistema de reservatórios do Projeto Central Valley, na Califórnia/Estados Unidos, submetidos a múltiplos usos. Nesse caso, cada reservatório deve satisfazer demandas individuais em suas próprias bacias, mas também há demandas a serem satisfeitas conjuntamente por todos os reservatórios. Assim, ao modelo de simulação, foi associado um submodelo de otimização que identifica as decisões ótimas quanto às vazões liberadas em cada período da simulação por cada reservatório do sistema, considerando suas restrições operacionais e adotando regras distintas para as fases de enchimento e deplecionamento dos reservatórios.

Georgakakos (1993) desenvolveu um modelo de controle para a gestão operacional do sistema de reservatórios existentes ao longo do rio Savannah, nos Estados Unidos, utilizados para controle de cheias, navegação, abastecimento de água, recreação, redução da poluição, produção de energia e manutenção dos ecossistemas aquáticos. O modelo

Tabela 4.1 – Aplicações da Programação Dinâmica à otimização da operação de reservatórios de usos múltiplos

<b>Autores</b>	<b>Reservatório</b>	<b>Usos</b>	<b>Método utilizado</b>
Opricovic e Djordjevic (1976)	Projeto de sistema de reservatórios na bacia de Vardar, Iugoslávia	Produção de energia Irrigação Abast. de água Controle de poluição	PDE, implementada em 3 níveis, para otimização da operação em longo prazo
Yeh e Becker (1982)	Sistema de reservatórios na Califórnia/EUA	Produção de energia Proteção ambiental Abast. de água Recreação	Associação da Programação Linear Iterativa e PD para otimização da operação
Stedinger <i>et al.</i> (1984)	Reservatório High Aswan, bacia do rio Nilo	Irrigação Produção de energia	PDE
Tejada-Guibert <i>et al.</i> (1993)	Sistema Shasta-Trinity, na Califórnia/EUA	Abast. de água Produção de energia	PDE
Liang <i>et al.</i> (1996)	Sistema de reservatórios na bacia do rio Colorado/EUA	Produção de energia Abast. de água	2 modelos de PDE, com diferentes funções-objetivo e restrições quanto à vazão mínima a ser liberada
Gobbetti <i>et al.</i> (1997)	Reservatório de Guarapiranga/Brasil	Produção de energia Abast. de água	PDE
Michalland <i>et al.</i> (1997)	Reservatório no vale de Dordogne/França	Produção de energia Irrigação	Métodos das Restrições, Penalidades e Ponderação, para geração do conjunto de soluções não-inferiores, associados à PDE para otimização
Özelkan <i>et al.</i> (1997)	Lago Tenkiller, Oklahoma/EUA	Controle de cheias Produção de energia Abast. de água	Programação Linear para modelagem física do problema, associada à Programação Linear Quadrática e à PDE para otimização
Chatterjee <i>et al.</i> (1998)	Reservatório New Don Pedro, Califórnia/EUA	Produção de energia Irrigação	PDE

incorpora as incertezas relativas às afluições e permite aos decisores avaliar os impactos de diversas alternativas operacionais pela geração dos *trade-offs* entre os objetivos.

Além disso, o modelo considera quatro modos operacionais distintos, correspondendo à operação em período seco, normal, moderadamente chuvoso e bastante chuvoso. Isso permite incorporar preocupações específicas associadas a cada um desses modos, bem como estimar os diferentes *trade-offs* entre os objetivos. Por exemplo, em condições normais de operação, espera-se que o sistema atenda os contratos de energia e que os níveis d'água sejam próximos às metas especificadas por curvas-regra. Essas metas variam sazonalmente e observam restrições associadas à proteção contra cheias, à conservação da qualidade da água e às atividades de recreação. No entanto, na iminência ou durante um período seco, a operação encontra um dilema: continua a operação em condições normais, sob o risco de enfrentar maiores problemas de não-atendimento, ou começa a diminuir a geração de energia para manter as reservas por mais tempo. Problema semelhante é observado em épocas de cheias, quando o operador deve avaliar se é melhor manter os níveis correntes de defluência, sob pena de ser forçado a “perder” vazão por vertimento no futuro, ou aumentar moderadamente a vazão turbinada.

Oliveira e Loucks (1997) desenvolveram metodologia de aplicação geral que utiliza algoritmos genéticos para gerar conjuntos sucessivos de políticas operativas possíveis. Para uma dada série hidrológica de vazões, cada política é, então, avaliada por meio de simulação, sendo-lhe atribuído índice de desempenho. O processo é iterativo até que não se consiga melhorar o desempenho obtido.

Cai *et al.* (2001) aplicaram a Programação Linear combinada a algoritmos genéticos para desenvolver modelo de operação de reservatórios cujas equações para representação da geração de energia e da topologia do reservatório sejam não-lineares. O modelo identifica as variáveis complexas do modelo não-linear que, quando pré-definidas, permitem a solução linear do problema remanescente; tais variáveis, então, são modificadas por meio de algoritmos genéticos.

Koutsoyiannis *et al.* (2002) desenvolveram ferramenta de suporte à decisão baseada em metodologia proposta por Nalbantis e Koutsoyiannis (1997, *apud* Koutsoyiannis *et al.*, 2002), a qual já foi aplicada a dois grandes sistemas de reservatórios da Grécia. No modelo, as vazões liberadas em cada estágio não são consideradas as variáveis de decisão. Em vez disso, introduzem-se regras parametrizadas simples para descrição de políticas operacionais, reduzindo o problema do excesso de variáveis, comum à Programação Dinâmica.

Os parâmetros desconhecidos são estimados por otimização não-linear. Emprega-se, então, simulação estocástica para valorar a função-objetivo, para cada conjunto de valores dos parâmetros. As restrições do sistema são tratadas na simulação e as variáveis de controle do problema, ou seja, os parâmetros, não dependem das séries de vazões afluentes propriamente ditas, mas somente das propriedades estatísticas dessas séries. Um procedimento global de otimização coordena as simulações sucessivas, no sentido de variar os valores dos parâmetros em cada iteração (por método não-linear), até que haja convergência para a solução ótima da função-objetivo.

Pode-se perceber que as técnicas de otimização da operação de reservatórios anteriormente discutidas são complexas do ponto de vista matemático e, por isso, podem não ser suficientemente transparentes para os usuários (gestores e operadores), que se sentem desconfortáveis em adotar na prática essas técnicas sofisticadas. Além disso, como enfatizaram Russel e Campbell (1996), essas técnicas exigem um alto grau de abstração que resulta, ao final, em grandes simplificações que limitam sua aplicação a casos concretos.

Com vistas a flexibilizar a abordagem do problema, a lógica difusa, baseada na teoria dos conjuntos difusos, tem sido crescentemente aplicada para a obtenção de políticas de operação de reservatórios com múltiplos objetivos, freqüentemente associada à Programação Dinâmica. Essa técnica permite analisar e incorporar aos modelos matemáticos as imprecisões das variáveis hidrológicas envolvidas, dos objetivos qualitativos e não-mensuráveis e do próprio contexto decisório participativo. Também permite incorporar a experiência de especialistas, tornando os modelos mais aceitáveis por parte dos operadores e gestores.



Shrestha *et al.* (1996) desenvolveram modelo baseado em regras difusas para derivar políticas operativas para um reservatório de múltiplos usos, tendo sido aplicado ao lago Tenkiller, nos Estados Unidos. As regras de operação são geradas a partir de critérios de desempenho econômico (produção de energia, demandas para irrigação e abastecimento doméstico e municipal, controle de cheias e navegação) e de critérios sócio-ambientais (recreação, regularização da vazão de jusante e qualidade da água adequada para a preservação ambiental).

O modelo de regras difusas desenvolvido opera sob o princípio “se-então” (“if-then”), em que o “se” é um vetor de variáveis ou premissas difusas, e o “então” é um vetor de conseqüências difusas. No caso de estudo, as variáveis foram o nível d’água do reservatório no tempo  $t$ , a afluência, a previsão das demandas e a época do ano, sendo que a conseqüência difusa foi a vazão liberada na UHE para atender as demandas. As variáveis “nível d’água”, “afluência” e “vazão liberada” foram representadas por composições de números difusos triangulares. A previsão de demandas pode assumir cinco estados (baixa, média-baixa, média, média-alta e alta) e o ano hidrológico foi dividido em duas épocas (janeiro a junho e julho a dezembro).

Apresenta-se, a seguir, a estrutura do sistema de regras do modelo desenvolvido, em que  $\oplus$  representa a operação lógica “e”:

se “nível d’água” é  $A_{i,1} \oplus$  “previsão de afluências” é  $A_{i,2} \oplus$   
 $\oplus$  “previsão de demandas” é  $A_{i,3} \oplus$  “época do ano” é  $A_{i,4}$   
então “vazão liberada” é  $B_i$

As regras difusas foram obtidas e validadas a partir de dois conjuntos de dados disponíveis para o lago Tenkiller, referentes a diferentes períodos, o que permite incorporar, implicitamente, a experiência dos responsáveis pela operação do reservatório.

Para avaliar as regras derivadas pelo modelo, foram definidos dois conceitos: a sustentabilidade e o risco técnicos. A sustentabilidade técnica é definida como uma função da confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, critérios comuns para avaliar sistemas hidrológicos. O risco técnico é calculado a partir da confiabilidade, reparabilidade e recorrência dos incidentes. Em termos sucintos, a confiabilidade é a probabilidade de um

estado do sistema ser satisfatório, ou seja, de que as demandas sejam satisfatoriamente atendidas. A resiliência é a probabilidade de o sistema passar para um estado satisfatório no tempo  $t$ , tendo estado em um estado insatisfatório no tempo  $t - 1$ , ou seja, é uma medida de quão rápido o sistema se recupera de falhas. A vulnerabilidade indica a severidade média de um incidente, sendo que o período de recorrência reflete o intervalo médio esperado entre duas falhas consecutivas ou, de outro modo, no número de eventos de falhas por unidade de tempo.

Panigrahi e Mujumdar (2000) também desenvolveram um modelo de inferência difusa para a otimização da operação do reservatório Malaprabha/Índia, utilizado para irrigação. Foram construídas funções difusas de associação para a vazão afluente, o volume armazenado, a vazão de demanda e a vazão liberada. Em substituição à participação de especialistas, foi feita simulação da operação do reservatório com uma política operativa estacionária, a partir de um modelo de Programação Dinâmica Estocástica Explícita, a qual forneceu a base de conhecimento necessária para a formulação das regras difusas baseadas no princípio “if-then”. Os autores ressaltaram que, apesar de os modelos de regras difusas serem de fácil desenvolvimento e utilização, também sofrem da “praga da dimensionalidade”, o que inviabiliza sua aplicação a problemas mais complexos.

Owen *et al.* (1997) desenvolveram metodologia que busca incorporar a incerteza inerente à modelagem da variabilidade das percepções quanto à satisfação dos objetivos difusos associados à operação de reservatórios, experimentadas pelos diversos especialistas e tomadores de decisão envolvidos, devido a fatores como falta de conhecimentos técnicos e diferentes experiências e qualificação profissionais. Essa metodologia foi aplicada ao reservatório Flaming Gorge, em Utah/Estados Unidos, construído originalmente para abastecimento de água, controle de cheias e geração de energia e, mais recentemente, utilizado, também, para fins recreacionais e de conservação ambiental.

As informações necessárias para a construção das funções de satisfação dos objetivos difusos foram obtidas via questionários de pesquisa aplicados a diversos setores usuários e especialistas. As respostas foram categorizadas por objetivo e estação do ano. Cada categoria foi analisada por regressão não-linear para determinar a equação de melhor ajuste, bem como os parâmetros do ajuste. As funções associativas foram construídas, então, a partir dos parâmetros estatísticos (média e desvio-padrão) das respostas.

Esses autores constataram que o grau de variabilidade entre os entrevistados foi dependente da natureza do objetivo considerado. Desse modo, como as características da produção de energia são inerentemente mais quantitativas, esse objetivo apresentou a menor variabilidade das avaliações. Por outro lado, elevados desvios-padrão foram obtidos entre as respostas relacionadas aos objetivos de conservação ambiental, cenário paisagístico e práticas recreativas, devido à forma como as questões foram apresentadas nos questionários e, também, à natureza qualitativa e subjetiva dos critérios de avaliação da satisfação.

Fontane *et al.* (1997) desenvolveram metodologia baseada na Programação Dinâmica Estocástica Implícita, utilizando funções difusas para a avaliação dos múltiplos objetivos associados à operação de reservatórios. Essas funções difusas, distintas para as diferentes estações do ano, foram obtidas a partir de consultas a especialistas e usuários. A metodologia foi aplicada ao planejamento operacional do reservatório Grey Mountain, no Colorado/Estados Unidos, em fase de projeto, a ser utilizado para produção de energia, suprimento de água para consumo humano e industrial, controle de cheias, atividades esportivas preservação de *habitat* para peixes.

Na formulação do problema, o armazenamento ao fim de cada ano foi tratado como objetivo difuso, assim expresso: “volume armazenado no fim de setembro será próximo ao volume total”. Todos os outros usos foram tratados como restrições: suprimento “adequado” de água para abastecimento doméstico e industrial, geração “eficiente” de energia e atividades esportivas “satisfatórias”, por exemplo. As restrições foram ponderadas por pesos diferentes a cada estação do ano. Os resultados demonstraram que essa abordagem pode tratar adequadamente problemas com objetivos não quantitativos, fornecendo resultados facilmente interpretáveis referentes ao grau relativo de atendimento a cada objetivo.

Tilmant *et al.* (2002a) desenvolveram metodologia similar à de Fontane *et al.* (1997), baseada na Programação Dinâmica Estocástica Difusa. Essa metodologia foi aplicada ao reservatório Mansour Eddahbi/Marrocos, utilizado prioritariamente para irrigação, controle de cheias e produção de energia.

As funções de satisfação dos objetivos operacionais, expressos lingüisticamente por expressões do tipo “geração eficiente de energia”, “proteção adequada contra cheias” e “suprimento adequado de água”, foram obtidas com o auxílio de especialistas familiarizados com a operação do reservatório, a partir da identificação do melhor valor (mais aceitável, mais seguro), que corresponde ao valor 1 (satisfação total), e do pior valor (menos aceitável, menos seguro), que corresponde ao valor 0 (completa insatisfação), relativos ao atendimento das demandas. Assumindo que não há descontinuidades na evolução das preferências, esses valores limites foram ligados por uma curva sigmoidal. No entanto, deve-se ressaltar que há outras metodologias e tipos de função possíveis para derivar essas funções associativas.

Esses objetivos operacionais são tratados, em cada estágio da simulação, como restrições flexíveis do sistema, passíveis de não serem completamente satisfeitos, e representam as conseqüências imediatas das decisões tomadas. Ressalta-se que tal consideração permite relaxar o conjunto de soluções possíveis, de modo que as soluções parcialmente possíveis também sejam examinadas. Foram conferidos pesos diferentes a cada objetivo, em função do período da simulação.

Os autores definiram, também, uma meta difusa de longo prazo – “garantir a continuidade da operação satisfatória do sistema”, no caso em estudo –, que corresponde às futuras conseqüências das decisões atuais. O grau de atendimento dessa meta é obtido a partir do conjunto das decisões otimizadas calculadas nos estágios anteriores.

Os autores consideraram, ainda, que os múltiplos objetivos operacionais, expressos tanto em termos de objetivos operacionais imediatos e de metas de longo prazo, devem ser agregados de modo a buscar a satisfação simultânea. No entanto, como a satisfação completa de todos os objetivos é virtualmente impossível em um contexto de conflitos, as decisões gerenciais são tomadas de modo que haja alguma compensação entre diferentes graus de atendimento dos objetivos e restrições.

Em termos matemáticos, a ausência de compensação é obtida quando se utiliza o operador “min” de agregação, equivalente ao “e”. Nesse caso, a otimização é restringida pelo objetivo de pior desempenho, não sendo considerados os bons resultados obtidos em outros objetivos. De modo oposto, a compensação completa entre objetivos, alcançada com o

operador “max”, semelhante ao “ou”, leva à satisfação somente do objetivo de melhor desempenho, negligenciando os piores resultados.

Como se espera que todos os objetivos sejam, simultaneamente, quase satisfeitos, a compensação deve se dar no intervalo [min, média], de modo a se aproximar mais do “e”, e não no intervalo [média, max]. Os autores propuseram, então, a utilização de um parâmetro de compensação  $\gamma \in [0,1]$ , que combina o operador “min” e a média aritmética, de forma a atuar no intervalo [min, média], mais próximo do “e” lógico. Assim, a agregação dos objetivos imediatos e de longo prazo é feita pelo operador “min” e multiplicada pelo fator  $[\gamma + \frac{1}{2}(1-\gamma)]$ , de modo que, para  $\gamma = 0$ , tem-se a operação de média aritmética, para  $\gamma = 1$ , tem-se a operação “min”, e para  $\gamma \in ]0,1[$ , há alguma compensação entre o atendimento dos objetivos imediatos e de longo prazo.

Por fim, para evidenciar os níveis de compensação entre os graus de satisfação dos objetivos e da meta de longo prazo, foram formulados diversos modelos estacionários, cada um com um nível de compensação específico, e comparados seus desempenhos em termos de confiabilidade e resiliência para diferentes graus de satisfação.

Convém ressaltar que a metodologia descrita (Programação Dinâmica Estocástica Difusa, ou Programação Dinâmica Estocástica Flexível) também foi aplicada a dois reservatórios no rio Vesdre (Bélgica) e, com algumas modificações quanto à agregação múltiplos dos objetivos operacionais, a dois reservatórios do complexo hidrelétrico do rio Uruguai, no Brasil (Tilmant *et al.*, 2002b).

Li e Lai (2001) associaram técnicas de avaliação sintética difusa e otimização difusa à Programação Dinâmica, para a solução de problemas multiestágio e multiobjetivo híbridos, ou seja, com objetivos quantitativos e qualitativos. A metodologia desenvolvida visa a encontrar a solução que maximiza o grau de satisfação sintética de todos os objetivos, ou seja, o grau de satisfação para o qual cada objetivo está mais próximo do seu valor ideal.

Para isso, são obtidas as avaliações marginais do grau de satisfação relativo ao ótimo de cada objetivo. A avaliação marginal de um objetivo indica em que grau cada decisão possível aproxima o objetivo de seu valor ideal, sendo um valor entre 0 e 1. Em outras

palavras, indica o grau de compatibilidade entre o valor ideal e o valor real do objetivo em questão. Por fim, essas avaliações marginais são agregadas, determinando em que grau a decisão satisfaz todos os objetivos, ou, ainda, o grau de compatibilidade dessa decisão com relação à decisão ótima ideal.

A avaliação dos objetivos quantitativos é expressa em termos de índices adimensionais, permitindo, desse modo, comparar e analisar os *trade-offs* entre objetivos quantitativos mensurados em unidades diferentes. Nesse caso, os valores ideal e anti-ideal associados a cada objetivo devem ser previamente definidos, e a avaliação marginal é obtida por interpolação linear nesse intervalo.

Os objetivos qualitativos são avaliados pelos tomadores de decisão por meio de variáveis lingüísticas difusas, contidas em um conjunto finito de termos (extremamente bom, muito bom, bom, regular, ruim, muito ruim, extremamente ruim). A cada um desses termos corresponde um número triangular difuso. A avaliação marginal de um objetivo qualitativo é obtida pelo valor total esperado desse número difuso, considerando-se um índice de otimismo  $\alpha \in [0,1]$  ( $\alpha = 0$  representa um ponto de vista pessimista do tomador de decisão, e  $\alpha = 1$ , otimista).

A agregação das avaliações marginais, para formar a avaliação global, é subjetiva, incorporando as preferências dos tomadores de decisão por meio da inclusão de pesos para os objetivos, que refletem a importância relativa entre eles. No entanto, a metodologia de agregação utilizada é diferente da média ponderada simples. Os autores propuseram a divisão do espaço decisório  $D$  em  $c$  categorias difusas (decisão boa-médio-ruim ou ótima e não-ótima, por exemplo), de modo que cada decisão  $x \in D$  está associada a cada uma das categorias, em maior ou menor grau, por uma função difusa. Cada categoria é caracterizada por valores típicos para cada objetivo. Em termos gerais, busca-se identificar a que categoria a decisão “mais pertence”.

É interessante notar que a aplicação da lógica difusa não se restringe a problemas de determinação de políticas ótimas de operação de reservatórios, podendo ser adotada inclusive em contextos mais amplos, como o desenvolvimento sustentável da ocupação do solo, a conservação dos recursos hídricos e a gestão da qualidade da água. Um exemplo

nesse sentido é apresentado por Chang *et al.* (1997), que aplicaram uma abordagem multiobjetivo difusa ao planejamento da bacia do reservatório Tweng-Wen, em Taiwan, utilizado para controle de cheias, geração de hidreletricidade, irrigação, abastecimento, recreação e aumento da vazão mínima a jusante.

O modelo multiobjetivo difuso desenvolvido por esses autores tem por objetivo identificar estratégias sustentáveis de gestão que garantam o balanço entre os benefícios advindos da ocupação do solo da bacia e a conservação da qualidade da água do reservatório. A capacidade de carreamento do solo e a capacidade assimilativa do reservatório são os maiores limitantes do sistema. Os tipos de ocupação do solo foram avaliados de acordo com critérios econômicos (benefício econômico direto e influência sobre o nível de empregos) e ambientais (impactos na qualidade da água relacionados às cargas pontuais e difusas de nutrientes, matéria orgânica e sedimentos).

Primeiramente, foi construído um modelo determinístico linear, em que o desempenho global das alternativas de ocupação do solo é otimizada para cada critério, estando sujeita às limitações do sistema. O resultado desse modelo é uma matriz de *payoffs*, cujos valores foram utilizados para derivar as funções difusas. A interseção dessas funções difusas, juntamente com a atribuição de pesos para os critérios, permitiu concluir que um aumento da área residencial é viável caso a poluição resultante seja adequadamente controlada e que a pecuária não deve ser permitida em nenhuma parte da bacia.

Há casos de sistemas de apoio à gestão de reservatórios de usos múltiplos, baseados na simulação de cenários, que pressupõem a participação ativa dos gestores como forma de favorecer a utilização efetiva desses modelos. Um exemplo é o sistema interativo de gestão desenvolvido por Stam *et al.* (1998).

Esses autores desenvolveram um sistema de apoio à decisão interativo para a gestão do lago Kariba, entre o Zâmbia e o Zimbábue. A gestão desse lago apresenta dois objetivos conflitantes: manter um nível de produção de energia constante e o maior possível e proporcionar, no início do período chuvoso, um volume de espera suficiente para o amortecimento de cheias, com vistas a evitar grandes descargas pelas comportas de segurança da barragem.

O processo de decisão é estruturado em três estágios, os quais são repetidos a cada mês. No primeiro estágio, são utilizados dois modelos: um modelo de previsão de vazões afluentes, baseado no método de Box-Jenkins, para estimar as afluições ao reservatório para os 12 meses subsequentes, e um modelo que, a partir das afluições previstas e do armazenamento no mês, propõe uma seqüência de liberação de vazão ao longo dos 12 meses, de acordo com regras operativas determinadas previamente por meio de simulação de cenários e otimização.

No segundo estágio, o gestor analisa e avalia, interativamente, o impacto, sobre a geração de hidreletricidade e o controle de cheias, tanto das vazões liberadas propostas no estágio anterior como de estratégias alternativas de liberação. Nesse estágio, também podem ser explorados os impactos caso as afluições previstas no modelo não sejam observadas na realidade, por exemplo, pela ocorrência de eventos extremos. São avaliados diversos aspectos relativos à evolução do armazenamento e do nível d'água do reservatório ao longo dos 12 meses analisados, incluindo os desvios da estratégia proposta em relação às estratégias adotadas no passado. A decisão final sobre a vazão a ser liberada ao longo do mês subsequente leva em conta, além das análises e comparações técnicas, a intuição e a experiência do gestor.

Uma vez que a decisão sobre a vazão a ser liberada foi tomada e implementada no segundo estágio, ao fim do mês em questão, no terceiro estágio são atualizados os parâmetros e variáveis do modelo – vazão liberada de fato, evaporação e afluição reais no período, quantidade de energia produzida e vazão vertida, armazenamento ao final do período –, de modo a viabilizar a análise no mês subsequente.

Rao *et al.* (2001) implementaram sistema de apoio ao controle operacional idêntico ao desenvolvido por Stam *et al.* (1998), apenas adotando metodologias diferentes para a previsão de afluições. Esse sistema foi aplicado ao reservatório Kirazdere/Turquia, que deve atender obrigações contratuais de fornecimento de água sem, contudo, exceder um risco aceitável de ocorrência de cheias a jusante do reservatório nem impor, futuramente, restrições severas ao abastecimento.



Dentre as aplicações de metodologias multicritério de apoio à decisão, citam-se os trabalhos de Laabs e Schultz (1992), Harboe (1992), Flug *et al.* (2000) e de Hämäläinen *et al.* (2001).

Laabs e Schultz (1992) apresentaram um método multiobjetivo de apoio à decisão em três estágios, o qual foi desenvolvido buscando-se facilitar sua utilização pelo decisor. Esse método foi aplicado ao reservatório Wupper/Alemanha, utilizado para aumento de vazões mínimas, abastecimento de água, produção de energia, recreação e melhoria da qualidade da água.

No primeiro estágio, a PDE é combinada ao Método da Ponderação para permitir a combinação dos vários objetivos operacionais em uma única função-objetivo. Com a variação sistemática dos pesos dos objetivos, são geradas diversas regras operativas ótimas, cujo desempenho é avaliado por meio de um modelo de simulação da operação do reservatório no segundo estágio do modelo. Os resultados da simulação são estatisticamente analisados, de modo a computar a confiabilidade quanto ao atendimento dos vários objetivos, associada a cada regra operativa.

Os referidos autores ressaltaram que o maior problema para a aplicação das técnicas multicritério de apoio à decisão reside na necessidade de o decisor especificar suas preferências com relação aos vários objetivos. Nesse sentido, os métodos com articulação prévia de preferências apresentam a desvantagem de que é difícil para o decisor antecipar as conseqüências que a definição das preferências terão sobre os resultados finais, ao passo que os métodos com articulação progressiva de preferências viabilizam essa previsão, mas demandam mais tempo do decisor. Por esse motivo, no terceiro estágio, o decisor escolhe a Programação de Compromisso ou o método Semops (Sequential Multiobjective Problem Solving Technique) para auxiliá-lo na tarefa de escolher a regra operativa ótima, de acordo com suas preferências com relação aos vários objetivos.

Harboe (1992), a título comparativo, associou à PD e à simulação da operação de reservatórios várias técnicas multiobjetivo de apoio à decisão, para a definição de regras ótimas ou satisfatórias de operação de reservatórios. Para os reservatórios Shasta e Folsom, na Califórnia/EUA, foi utilizado o Método das Restrições, considerando-se o conflito entre geração de energia e irrigação. Já para o sistema de reservatórios de Wupper/Alemanha,

foram avaliados, pela Programação de Compromisso, conflitos entre o controle de cheias e o aumento de vazões mínimas.

Ainda para esse mesmo sistema de reservatórios, foram aplicados a Programação de Metas, o método de Tchebycheff (max-min), a Programação de Compromisso, o Consenso e o Electre I e II, considerando objetivos relacionados ao aumento de vazões mínimas e à recreação. Para todos os métodos, adotaram-se parâmetros similares. Os resultados foram praticamente idênticos para todos os métodos, com exceção do Electre I e II. Como conclusões, os autores ressaltaram a robustez da Programação de Compromisso, no que se refere à mudança de pesos dos objetivos, no caso do aumento de vazões mínimas, e a forte influência do parâmetro  $p$  desse método sobre o resultado. Ressaltaram, ainda, que, apesar de se tratarem de métodos com articulação prévia de preferências, podem, em aplicações reais, ser aplicados interativamente.

Flug *et al.* (2000) aplicaram um método multicritério de auxílio à decisão ao caso do reservatório de Glen Canyon, na bacia do rio Colorado/EUA. Foram consideradas nove alternativas discretas de liberação de vazão, inclusive a alternativa de manter a política de operação vigente, conforme autorizada pelo projeto original do reservatório (nada fazer). Essas alternativas foram avaliadas segundo sete critérios: peixes, vegetação, habitat e vida selvagem, espécies raras ou ameaçadas, recursos culturais, recreação e produção de energia, sendo cada um desses critérios avaliado por atributos específicos.

A atribuição das respostas, em termos de impactos ou benefícios, de cada alternativa para cada um dos atributos, resultou numa matriz mista, composta de termos qualitativos e valores numéricos, esses últimos expressos em diversas unidades (monetária, percentual de área afetada, etc). Conforme ressaltaram os autores, a avaliação dos atributos não é responsabilidade de alguma parte interessada nem deve ser influenciada individualmente por essa parte, devendo ser feita, preferencialmente, por profissional que entenda a influência das variáveis relativas ao armazenamento e à defluência do reservatório sobre os diferentes atributos. No caso do reservatório de Glen Canyon, foram utilizados os valores atribuídos pelo EIA – Estudo de Impacto Ambiental, os quais foram posteriormente padronizados a partir de uma escala numérica de 1 a 9.

Foram identificados, a partir de pesquisas junto a todas as partes interessadas e da interpretação do EIA do projeto Glen Canyon e da legislação aplicável, diferentes cenários de pesos para os critérios, representando os vários interesses. Dos vários conjuntos de pesos resultantes, foram separados quatro para um estudo mais detalhado: um que prioriza a produção de energia às expensas de todos os outros critérios, outro em que os sete critérios são igualmente importantes, um terceiro conjunto ponderado ambientalmente, e outro em que a energia também é prioritária, mas menos valorizada em relação aos demais critérios. As contribuições parciais dos atributos para os respectivos critérios foram obtidas por meio de pesquisas junto a especialistas durante duas conferências da ASCE (American Society of Civil Engineers).

Como resultado, verificou-se que três alternativas se mostraram fracamente aceitáveis, sendo uma delas a da não-ação (nada fazer). Por outro lado, cinco alternativas foram avaliadas como as melhores opções para os quatro cenários analisados. Apesar de a alternativa que favorece a proteção da vida aquática a jusante apresentar o maior desempenho global, o estudo indicou a alternativa que foi favorável às condições ambientais sem, contudo, afetar seriamente os propósitos originais do projeto do reservatório.

Hämäläinen *et al.* (2001) propuseram uma estrutura geral para os processos de modelagem e apoio multicritério à decisão em grupo, e descreveram a aplicação preliminar dessa estrutura ao processo decisório para definição da melhor política de gerenciamento do nível d'água do lago Päijänne, situado a montante dos lagos Konnivesi e Ruotsalainen e do rio Kymijoki, na Finlândia. O objetivo principal dessa estrutura é o processo evolutivo de aprendizagem.

O objetivo da política de operação original do sistema composto pelos lagos e rio citados era a redução de danos de enchentes e a maximização da produção de hidreletricidade. Entretanto, com a crescente importância dos aspectos ambientais, houve a necessidade de se reavaliar essa política de operação. Segundo os autores, para fornecer informações corretas sobre a nova regulação e, assim, ganhar o apoio e a confiança pública, o processo de planejamento da nova política incluiu o envolvimento das partes interessadas em todas as fases do processo decisório, desde a etapa de estruturação do problema às etapas de busca do consenso no grupo decisório e de busca da aceitação pública.

No primeiro estágio, foram identificados, por meio de questionários, os principais grupos de interesse e seus objetivos e critérios de decisão. No caso do lago Päijänne, os critérios de decisão são divididos segundo dois grandes objetivos: econômicos (produção de energia, pesca, cheias, abastecimento de água, navegação comercial e turismo) e sócio-ecológicos (recreação, cenário paisagístico, natureza e qualidade da água).

Também nesse estágio, foram definidas as duas variáveis de decisão, que são as metas de nível d'água nos dias 1º de abril e 1º de setembro, para a definição da política de operação, cujo objetivo, então, é o de respeitar o máximo possível os níveis-meta. Foram selecionadas seis metas de níveis d'água para serem avaliadas. Essa primeira etapa teve como principal resultado a melhoria da compreensão do problema e da comunicação interna no âmbito do grupo de decisores.

Na segunda etapa, foi identificado o conjunto das alternativas eficientes, a partir do conceito de otimalidade de Pareto. Para isso, foi utilizado um método iterativo baseado no melhoramento das direções, que contou com a participação de representantes dos grupos de interesse. Foram confrontados os desempenhos das alternativas de meta de níveis d'água, as quais foram comparadas duas a duas, permitindo a eliminação das alternativas dominadas.

No terceiro estágio, as alternativas selecionadas foram examinadas com mais cuidado pelos decisores, com vistas a alcançar o consenso do grupo sobre a política a ser adotada. Primeiramente, cada grupo de interesse priorizou os critérios de decisão segundo sua escala de valores. Em seguida, as preferências individuais foram convertidas em um modelo de preferência em intervalos, chamado modelo de programação de preferências. Por exemplo, supondo que, para um grupo, a pesca seja cinco vezes mais importante que o turismo, que, para outro grupo, esses critérios sejam igualmente importantes, e que todos os outros grupos considerem a pesca três vezes mais importante que o turismo. Todas essas avaliações estão entre “igualmente importantes” e “cinco vezes mais importante”, resultando na asserção de que “a pesca é até cinco vezes mais importante que o turismo”.

O próximo passo nesse estágio foi a avaliação, pelos decisores, do modelo de preferências em intervalos, para auxiliar a discussão sobre os aspectos conflitantes. O consenso pôde ser atingido por meio do ajuste dos intervalos das preferências, ou seja, pela proposição de

*trade-offs* entre as preferências. Essa tarefa foi auxiliada por um aplicativo capaz de apresentar, interativamente, o impacto sobre os pesos dos critérios advindos de determinada mudança nos intervalos das preferências.

Pode-se observar, a partir dos diversos casos relatados de aplicação de modelos à gestão de reservatórios de usos múltiplos, que é usual a associação de diversas técnicas para o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão, em função dos objetivos a serem atendidos.

Desse modo, quando o objetivo do SAD é o de indicar a política operativa ótima de um reservatório de usos múltiplos, combinam-se modelos de simulação da operação do reservatório (estocásticos ou determinísticos) a técnicas de otimização, dentre as quais a mais comum é a Programação Dinâmica, ou a métodos multicritério de comparação e hierarquização de alternativas, como o Electre e o Promethee, por exemplo. Tais sistemas de apoio à decisão pressupõem um maior e melhor conhecimento a respeito dos usos desejados da água e dos diversos objetivos a serem atendidos com a operação do reservatório em estudo.

Quando o sistema visa a apoiar decisões sujeitas a maiores incertezas, como é o caso das decisões estratégicas de planejamento e de gerenciamento de recursos hídricos com múltiplos usos, normalmente se associam modelos de simulação de cenários a técnicas multicritério que favoreçam a estruturação do problema e a participação efetiva dos diversos setores usuários no processo decisório.

#### **4.2 - MODELOS APLICADOS À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS PARA CONTROLE DA QUALIDADE DA ÁGUA**

Número considerável de pesquisas têm sido realizadas visando ao desenvolvimento de políticas ótimas de operação de reservatórios de usos múltiplos. Os objetivos usuais são, por exemplo, a maximização dos benefícios associados à produção de energia, à irrigação, ou à minimização dos riscos de enchentes. Poucos estudos conferem maior importância a questões de qualidade da água.

Citam-se alguns estudos desenvolvidos no sentido de se controlar, por meio de operações de reservatórios, a qualidade da água liberada para jusante. Não foram encontrados, até o momento, estudos de otimização da operação de reservatórios para controle da qualidade da água armazenada.

Orlob e Simonovic (1982, *apud* Dandy e Crawley, 1992) estudaram a operação do reservatório New Melones, na Califórnia/EUA, tendo como um dos objetivos a diluição de águas salinas do rio San Joaquin, utilizado para irrigação. A salinidade no reservatório foi considerada constante e igual a 50 mg/L.

Fontane *et al.* (1981) desenvolveram modelo de otimização para operação de estrutura seletiva de descarga, com vistas a atender requisitos de temperatura da água a jusante de reservatório na Pensilvânia/EUA. Foi associado à Programação Dinâmica o modelo WESTEX, que possibilita a simulação do ciclo de estratificação térmica do reservatório, para minimizar o desvio entre as temperaturas simulada e permitida.

Hayes *et al.* (1998) integraram um modelo de qualidade da água (DORM-II/USACE) a um algoritmo de otimização (multiplicadores de Lagrange, com adição de funções de penalidade), para avaliar as possíveis melhorias na qualidade da água do rio Cumberland/EUA, a partir de modificações na operação do sistema de nove reservatórios de usos múltiplos existentes na sua bacia.

O modelo maximiza a produção de energia hidrelétrica, considerando os outros usos por meio do estabelecimento de restrições – nível máximo permitido para resguardar volume de amortecimento de enchentes, nível mínimo necessário para manter atividades de recreação, vazões mínimas a serem liberadas a jusante para manter condições ecológicas favoráveis e viabilizar a navegação –, permitindo controlar a temperatura e o oxigênio dissolvido da água ao longo do curso do rio.

Nandalal *et al.* (1995) desenvolveram dois modelos de otimização, utilizando a Programação Dinâmica Incremental, para obtenção de políticas operacionais para o reservatório de Jarreh, no rio Shapur/Irã, onde considerações sobre a qualidade da água – no caso, a salinidade – são mais importantes que a satisfação quantitativa das demandas. Um dos modelos manipula somente as vazões liberadas para melhorar a qualidade da água.

O outro modelo controla tanto as vazões liberadas como as vazões afluentes, determinando o momento e a quantidade de vazão afluente com baixa qualidade a ser coletada e desviada do reservatório.

Outro estudo que merece ser citado é o de Gough e Ward (1996). Refere-se ao processo de desenvolvimento de sistema de suporte à decisão para o gerenciamento estratégico do lago Ellesmere, na Nova Zelândia, com grande valor cultural, recreacional, comercial e de preservação ambiental. Em virtude dos usos, as considerações sobre a qualidade da água – principalmente no que se refere à concentração de nutrientes, à salinidade e à turbidez – são preponderantes aos aspectos quantitativos.

Considerou-se inviável, à época, estruturar sistema de suporte à decisão nos moldes tradicionais, devido ao conhecimento limitado dos processos ecológicos e suas respostas a estímulos externos, bem como às incertezas associadas ao contexto decisório, com componente político significativo e implicações sociais, culturais e econômicas.

Em vez disso, preferiu-se conceber ferramental que fosse realimentado continuamente, permitindo reavaliações do problema, dos objetivos (critérios) e das alternativas de ações de gerenciamento. Para isso, foi recomendado programa de monitoramento de longo prazo da qualidade da água para permitir a identificação de tendências e relações de causa e efeito.

O objetivo do sistema era o de, com o tempo, prover os decisores de meios formais para compreensão daquele Lago, bem como para investigação dos impactos de ações implementadas no âmbito do gerenciamento, constituindo-se instrumento valioso de planejamento das futuras decisões estratégicas.

## 5 - METODOLOGIA DA PESQUISA

Antes de detalhar a metodologia adotada para a realização do presente trabalho, convém ressaltar sua natureza exploratória. Sendo assim, a pesquisa bibliográfica foi voltada ao estudo de casos similares à problemática proposta, com o intuito de se promover uma reflexão crítica sobre as premissas e as metodologias que têm sido adotadas para o tratamento dos temas “gestão integrada e participativa de recursos hídricos com múltiplos usos” e “gestão de reservatórios”. Também com esse espírito exploratório é que foi feito levantamento e análise de dados a respeito do lago Paranoá, adotado como caso de aplicação. Essas etapas do trabalho viabilizaram, então, a concepção de um protótipo de suporte metodológico para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos, aplicado ao caso de estudo, mas que pode ser modificado e adaptado para outras aplicações.

As etapas do trabalho podem ser resumidas nas seguintes atividades:

- a) pesquisa bibliográfica e estudo de casos;
- b) levantamento e análise dos dados disponíveis sobre o reservatório tomado como caso de aplicação (lago Paranoá/DF);
- c) concepção das premissas do suporte metodológico;
- d) implementação de protótipo do suporte metodológico, aplicado ao caso de estudo;
- e) aplicação do protótipo ao caso de estudo;
- f) avaliação dos resultados da pesquisa.

O fluxograma de desenvolvimento do trabalho é apresentado na Figura 5.1.

A primeira atividade consistiu de pesquisa bibliográfica, que se dividiu em dois temas principais. O primeiro tema refere-se à identificação e à análise de metodologias de auxílio à decisão aplicáveis a problemas de gestão de recursos hídricos sujeitos a múltiplos usos, com ênfase a problemas de gestão de reservatórios. Foram analisadas experiências de aplicação de modelos de simulação, de técnicas de otimização monocritério e de metodologias multicritério, incluindo aplicações da teoria dos conjuntos difusos, em função de seu caráter promissor. O segundo tema pesquisado diz respeito a experiências de



otimização da operação de reservatórios com a consideração explícita de aspectos de qualidade da água.

A segunda atividade consistiu do levantamento dos dados hidrológicos e de qualidade da água do lago Paranoá. Foram desenvolvidos estudos hidrológicos da bacia do Lago, que permitiram estimar o balanço hídrico concentrado desse reservatório. A partir do balanço hídrico obtido, pôde-se estimar as séries das parcelas da drenagem urbana e do escoamento subterrâneo, associadas às séries hidrológicas das variáveis monitoradas (precipitação e fluviometria). Também foram feitos estudos sobre o tempo de residência hidráulica, para subsidiar a análise quanto à qualidade da água, e sobre a permanência das vazões no reservatório, para permitir a análise da possibilidade de utilização do reservatório para finalidades consuntivas (além da geração de energia).

Foi avaliada a evolução da qualidade da água do Lago ao longo dos últimos anos, com ênfase nos parâmetros indicadores de eutrofização e contaminação bacteriológica, o que forneceu subsídios para a avaliação dos usos da água do reservatório. Nesse sentido, foi analisado o contexto atual de utilização do lago Paranoá, bem como seus usos potenciais, com vistas a identificar eventuais conflitos entre usos e subsidiar o desenvolvimento do suporte metodológico de auxílio à gestão desse corpo d'água.

A pesquisa bibliográfica, a coleta de informações sobre o caso de estudo e o contato com gestores permitiram, então, a concepção das premissas do suporte metodológico de apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos. Considerou-se que o objetivo principal de uma ferramenta dessa natureza é de, em função dos usos pretendidos, compatibilizar os aspectos quantitativos do sistema – vazões afluentes e defluentes do reservatório, considerando-se a variabilidade hidrológica associada – e as restrições referentes à qualidade da água.

Nesse ponto, cabe a ressalva de que, no caso do lago Paranoá, os usos atuais não configuram situação de conflitos graves, tendo sido alcançada uma condição de relativo equilíbrio entre eles. O problema do aporte de nutrientes e de matéria orgânica está razoavelmente controlado, principalmente no que se refere às cargas pontuais, e, como a geração de energia não é uso prioritário, a regra operativa atual, definida com vistas a favorecer a qualidade da água armazenada, é restringida para não comprometer a

composição paisagística e a recreação. Avaliou-se, por isso, que não há necessidade de se desenvolver sistema de apoio à decisão quanto à política ótima de operação atual do reservatório.

Por outro lado, verificam-se a tendência de ocupação da bacia de drenagem do Lago e a possibilidade de se utilizar sua água para outros fins além dos atuais, como abastecimento de água e irrigação. Nesse sentido, é útil um sistema de apoio à gestão que permita simular os impactos de novas retiradas de água, bem como os impactos, em termos de cargas de nutrientes, relativos a novos adensamentos da bacia. Entretanto, como se trata de usos potenciais, configuram-se cenários hipotéticos em que não se dispõem de informações objetivas sobre a importância relativa entre esses usos. Dessa forma, foi construído um protótipo do suporte metodológico, para aplicação específica ao caso do lago Paranoá. Apesar das simplificações impostas para a construção do protótipo, deve-se ressaltar a vantagem de que, a partir de um modelo simples, fornecem-se subsídios para discussões sobre quais usos a sociedade deseja fazer do Lago. Caso a metodologia proposta seja de fato aplicável para o tratamento da questão, o suporte metodológico pode ser aperfeiçoado futuramente.

Os resultados da pesquisa foram avaliados por meio de análise de coerência das respostas obtidas com a aplicação do protótipo do suporte metodológico a situações hipotéticas de utilização da água do lago Paranoá. Também foram consultados especialistas e gestores, identificados em anexo, com o objetivo de se avaliarem as premissas adotadas para a concepção do suporte metodológico, a natureza das respostas desse suporte e a potencialidade de aplicação da metodologia proposta.

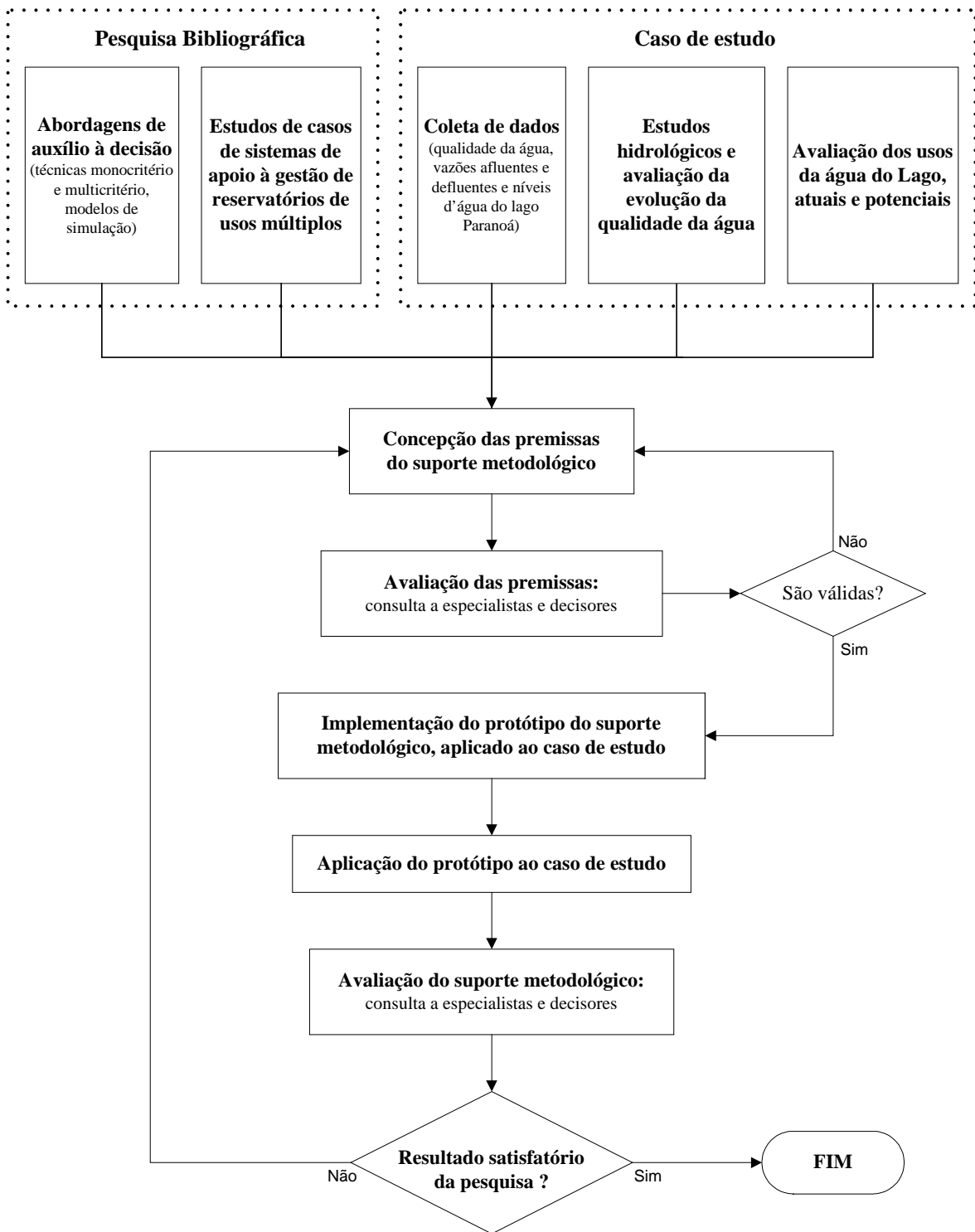


Figura 5.1 – Fluxograma da metodologia de desenvolvimento do trabalho

## **6 - CASO DE APLICAÇÃO: O LAGO PARANOÁ/ DF**

No primeiro tópico, grandemente inspirado no trabalho de Ferrante *et al.* (2001), apresentam-se as características da bacia hidrográfica do lago Paranoá, no Distrito Federal, consideradas relevantes. Em seguida, são apresentados os estudos hidrológicos realizados para a caracterização quantitativa do Lago, bem como se faz análise evolutiva da qualidade da sua água, com ênfase nos parâmetros indicativos de eutrofização e contaminação bacteriológica. Por fim, discutem-se aspectos referentes aos principais usos atuais e às potencialidades não exploradas do Lago.

### **6.1 - CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA**

A bacia do lago Paranoá está localizada na região central do Distrito Federal, abrangendo uma área de aproximadamente 1.034,07 km<sup>2</sup>, o que corresponde a cerca de 18% do seu território. Engloba as Regiões Administrativas (RAs) de Brasília, Lago Sul, Lago Norte, Cruzeiro, Núcleo Bandeirante, Candangolândia, Riacho Fundo, Guará, parte de Taguatinga e a área urbana do Paranoá.

É a única bacia com mais de 1000 km<sup>2</sup> integralmente localizada em território do Distrito Federal, ou seja, com todas as nascentes situadas no quadrilátero do DF, o que possibilita total controle sobre os mananciais que abastecem o lago Paranoá.

O clima predominante da região é caracterizado pela ocorrência bem definida de verões chuvosos e invernos secos. A estação chuvosa se inicia em outubro e termina em abril, representando cerca de 90% do total precipitado no ano. O trimestre mais chuvoso é o de novembro a janeiro. A estação seca vai de maio a setembro, sendo o trimestre de junho a agosto o mais seco, responsável por somente cerca de 2% do total anual.

A umidade relativa do ar acompanha o padrão sazonal das precipitações. Apresenta pequena variação de janeiro a abril, com média de 77%, seguindo-se queda acentuada dos valores até setembro, com mínima em agosto, para voltar a recuperar a umidade a partir de outubro, com a chegada das chuvas.

A insolação tem comportamento inverso ao da umidade, sendo máxima nos meses de julho e agosto. Com relação à temperatura média do ar, os meses de setembro e outubro são os mais quentes, sendo o mês de julho é o mais frio. A evaporação é maior no trimestre julho-setembro, atingindo seu máximo em agosto.

O lago Paranoá foi formado a partir do barramento do rio Paranoá, no ano de 1959, represando águas do riacho Fundo, do ribeirão do Gama e do córrego Cabeça de Veado, ao sul, e do ribeirão Torto e do córrego Bananal, ao norte, além de pequenos córregos que drenam diretamente para o Lago.

Compõem a bacia do lago Paranoá as unidades hidrográficas mostradas na Figura 6.1. Os itens seguintes apresentam algumas características dessas unidades.

#### **6.1.1 - Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto**

Nessa unidade hidrográfica, há duas importantes captações da CAESB, uma na barragem do Santa Maria e outra no ribeirão do Torto, onde são captados, respectivamente, cerca de 1.200 l/s e 500 l/s destinados ao abastecimento público. O ribeirão do Torto deságua diretamente no lago Paranoá com vazão média da ordem de 2,6 m<sup>3</sup>/s. A sub-bacia do ribeirão do Torto está inserida, em grande parte, no Parque Nacional de Brasília. A jusante do Parque, o Ribeirão cruza áreas predominantemente rurais e áreas urbanas de uso controlado, como os assentamentos da Granja do Torto e da Vila Varjão. Nas proximidades da Península Norte, vem recebendo crescente pressão das ocupações das Quadras do Lago (QLs), bem como dos parcelamentos irregulares no Setor de Mansões do Lago Norte. O Torto apresenta contribuição maior de matéria orgânica, fosfato e nitrogênio do que o ribeirão Bananal, constituindo-se no tributário da porção norte que oferece maior contribuição de nutrientes e maior risco de assoreamento ao Lago.

#### **6.1.2 - Unidade Hidrográfica do Bananal**

Nessa unidade, está localizada a área de lazer conhecida pelo nome de Água Mineral. Está localizada, em sua quase totalidade, dentro do Parque Nacional de Brasília, o que garante uma boa qualidade das águas do ribeirão Bananal. O Ribeirão deságua diretamente no lago Paranoá com vazão média da ordem de 2,4 m<sup>3</sup>/s. Entretanto, em função da contribuição de

ocupações urbanas nas proximidades do seu curso (Setor Sudoeste, Rodoferroviária, SAAN e extremidade da Asa Norte), verifica-se carga diária de nitrogênio e fosfato pouco menor do que a do ribeirão do Gama, com visível processo de assoreamento no seu percurso até a confluência com o Lago.

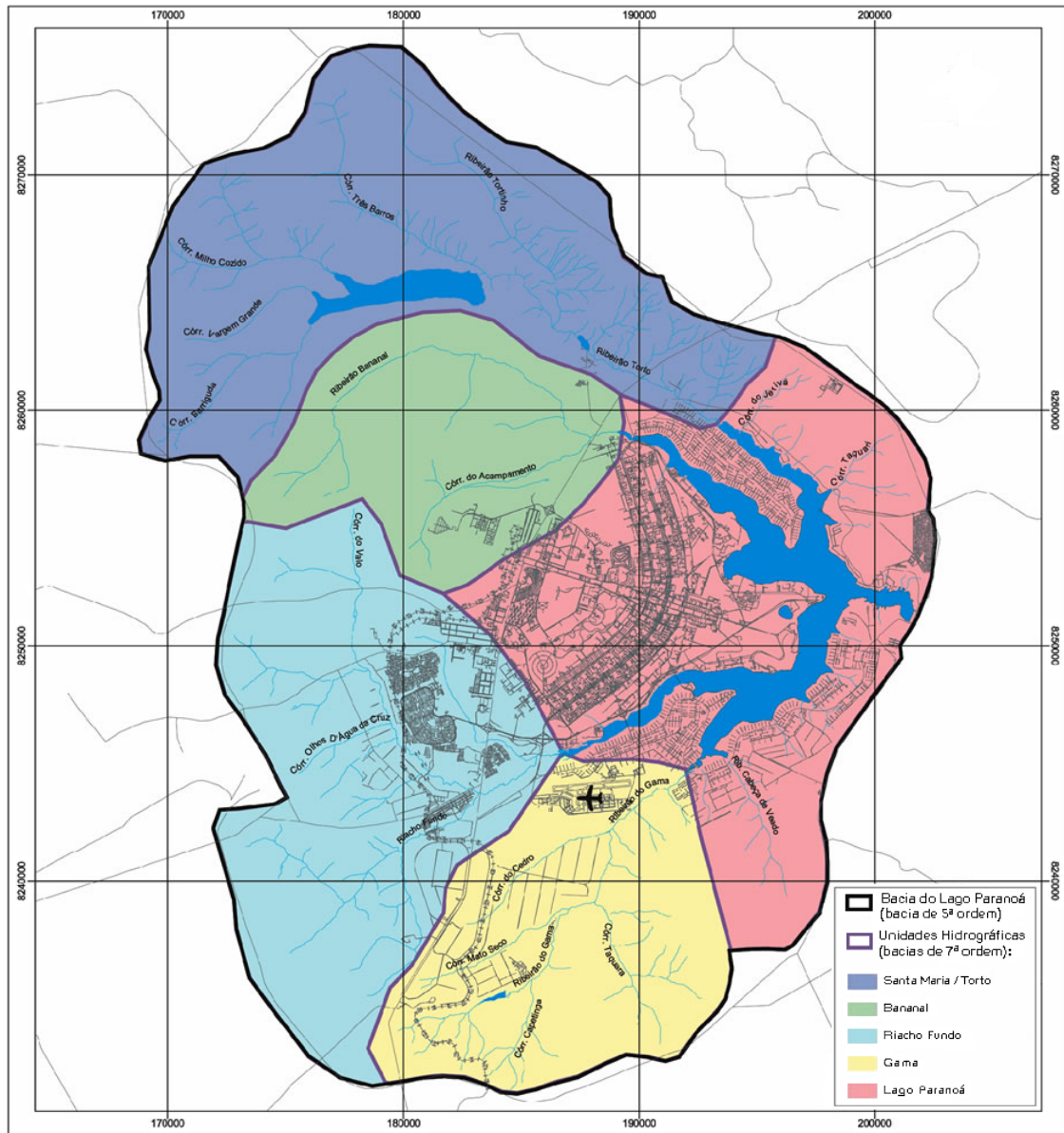


Figura 6.1 – Carta de unidades hidrográficas da bacia do lago Paranoá, sem escala (Semarh, 2001, adaptado).

### **6.1.3 - Unidade Hidrográfica do riacho Fundo**

A vazão média do riacho Fundo é de cerca de 4,0 m<sup>3</sup>/s. A sub-bacia do riacho Fundo é a que apresenta a maior densidade e diversidade de ocupação. Em decorrência dos desmatamentos ocorridos, acompanhados da exploração de cascalheiras, exposição e degradação dos solos, movimentações de terra e forte urbanização, fatores agravados pela topografia da bacia, tem-se um aporte substancial de sedimentos, comprovado pelo grave assoreamento do braço do lago Paranoá que recebe a contribuição da sub-bacia. É também no riacho Fundo que se observam as cargas mais expressivas de nutrientes, nitrogênio orgânico e demanda bioquímica de oxigênio.

### **6.1.4 - Unidade Hidrográfica do Gama**

O ribeirão do Gama deságua no lago Paranoá com vazão média de cerca de 2,9 m<sup>3</sup>/s. Essa sub-bacia apresenta duas áreas distintas, no que se refere ao uso e à ocupação do solo. A primeira é caracterizada por áreas preservadas, com os seus tributários, os córregos Roncador, Taquara e Capetinga, atravessando o Jardim Botânico, a Reserva Ecológica do IBGE e a Fazenda Experimental da UnB, respectivamente. A segunda área é mais ocupada, com os córregos Mato Seco e Cedro drenando o Núcleo Rural Vargem Bonita, áreas rurais e o Setor de Mansões Park Way. Em consequência das ocupações, as águas do ribeirão do Gama apresentam teores de fosfato e nitrogênio maiores do que o córrego Cabeça de Veado, bem como níveis mais significativos de assoreamento.

### **6.1.5 - Unidade Hidrográfica do lago Paranoá**

Além de contar com as contribuições dos afluentes principais, a unidade hidrográfica do Lago recebe águas da drenagem pluvial urbana e dos efluentes das duas estações de tratamento de esgotos situadas nas suas margens (ETEBs Sul e Norte). Recebe, também, a contribuição de corpos d'água de menor porte, como os córregos Taquari, Cachoeirinha e Cabeça do Veado. Nesses três córregos, existem pequenas captações de água da Caesb, para abastecimento público. A sub-bacia do Córrego Cabeça de Veado está localizada em área com baixa ocupação demográfica, com suas nascentes protegidas na Estação Ecológica do Jardim Botânico, por onde corre, no seu maior percurso, para o Lago. As águas desse contribuinte são de excelente qualidade, desprovidas de grandes concentrações

de nutrientes, levando pouca contribuição em termos de nitrogênio e fosfato para a porção sul do Lago, com níveis reduzidos de assoreamento.

## 6.2 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS

### 6.2.1 - Balanço hídrico do lago Paranoá

#### 6.2.1.1 - Base de dados

Os dados hidrológicos utilizados para as análises de correlação entre postos e para a contabilização do balanço hídrico do lago Paranoá são as séries históricas obtidas nos postos referidos na Tabela 6.1 e apresentados na Figura 6.2.

Tabela 6.1 – Estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas.

ESTAÇÃO	DESCRIÇÃO	CÓDIGO da ANA
fluviométricas	Torto (Montante Paranoá)	60477400
	Bananal (EPIA-003)	60477600
	Riacho Fundo (Montante Zoológico)	60478200
	Gama (Base Aérea)	60478500
	Cabeça do Veado (Dom Bosco)	60478600
	Barragem Paranoá (CEB)	60479200
pluviométricas	ETE Brasília Sul	01547008
	ETE Brasília Norte	01547009
	Contagem	01547010
	Área Alfa	01547014
	Santa Maria	01547017
	Jockey Clube	01547018
	Cabeça do Veado	01547019
	Barragem Paranoá (CEB)	01547020
	Jatobazinho	01548009
	Riacho Fundo (GM-3)	01548010
	Fazenda Santa Eliza	01548013



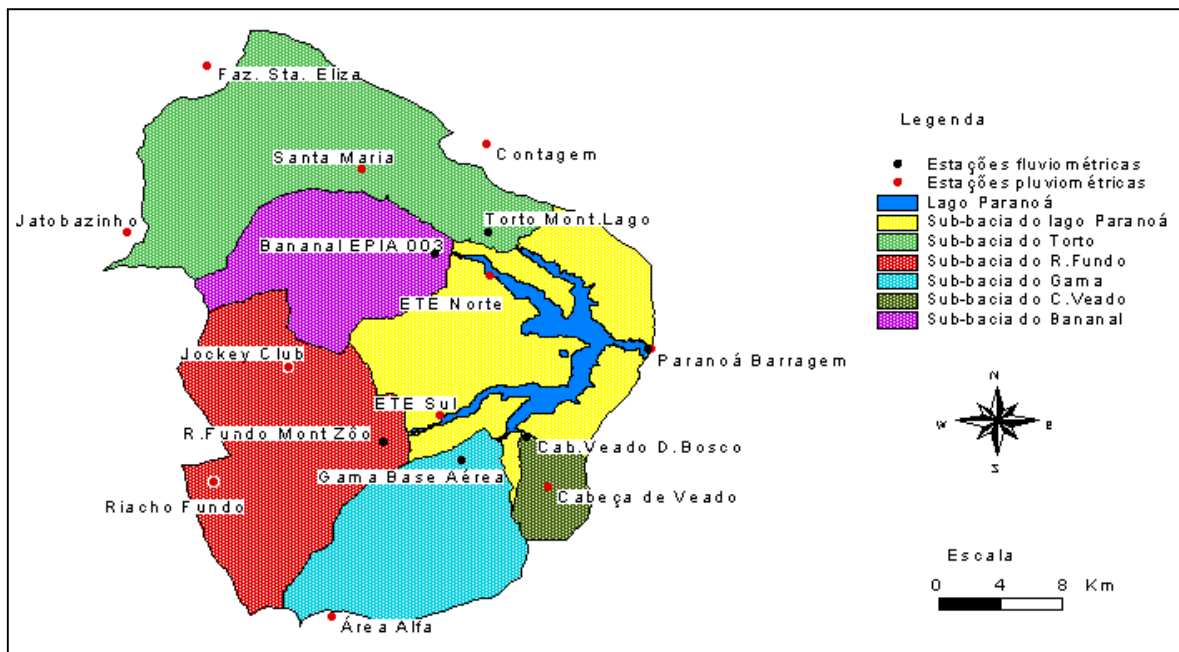


Figura 6.2 – Delimitação da bacia do lago Paranoá e suas sub-bacias e indicação dos postos fluviométricos e pluviométricos utilizados.

Além disso, dispõe-se dos seguintes dados:

- efluentes das ETEs Brasília Norte e Brasília Sul, nos períodos de 1979 a 1989 e 1992 a 2002;
- dados de consumo de água das áreas não servidas por sistema coletivo de coleta de esgotos a partir de 1994;
- curva cota-volume obtida por restituição da topografia da bacia hidráulica do Lago antes de seu enchimento;
- curva cota-volume obtida a partir de levantamento batimétrico em 2003;
- níveis d'água no Lago ao fim de cada mês, a partir de 1979;
- dados de evaporação de tanque classe A da estação evaporimétrica da Universidade de Brasília – série completa até 1995, com média de longo período a partir de 1972, e série com falhas até 1998.

Convém mencionar que também existem dados de vazão do posto fluviométrico do riacho Fundo Ponte Aeroporto, a jusante da confluência do riacho Fundo com o córrego Guará, a partir de 1988. No entanto, como esse posto não dispõe de curva-chave, os dados mencionados são de medições diretas de vazões, realizadas uma ou duas vezes por mês. Já para os demais postos fluviométricos, dispõe-se de dados diários de vazão que permitem o cálculo da vazão média mensal. Tendo em vista que o riacho Fundo apresenta grande

variação de vazão ao longo do dia e entre os dias, optou-se por desprezar os dados desse posto fluviométrico e estender a série do posto Montante Zoológico por correlação com o posto Gama Base Aérea.

#### 6.2.1.2 - Metodologia

Conhecidas as vazões mensais de entrada e saída do Lago, os respectivos níveis d'água no início e fim de cada mês e a curva cota-volume, pode-se relacionar as vazões de afluxo e defluxo e a variação de volume armazenado  $S$  em um determinado intervalo de tempo ( $t + 1$ ), a partir do volume inicial armazenado  $S(t)$ , conforme a Equação 6.1:

$$S(t + 1) = S(t) + I(t) - O(t) \quad (6.1)$$

em que:

- $S$  = volume armazenado;
- $I$  = vazões afluentes ao Lago devidas:
  - aos cinco tributários principais, monitorados por postos fluviométricos;
  - à precipitação direta sobre o espelho d'água;
  - aos efluentes lançados no Lago pelas estações de tratamento de esgotos;
  - às áreas não cobertas por postos fluviométricos:
    - contribuição natural do lençol freático;
    - drenagem pluvial urbana;
    - infiltração de águas servidas das áreas não atendidas por sistema público de esgotamento sanitário.
- $O$  = vazões defluentes do Lago devidas:
  - ao turbinamento e ao vertimento na barragem;
  - à evaporação direta do espelho d'água.

Ressalta-se que foi negligenciada a variação da área de espelho d'água para a contabilização da precipitação e evaporação diretas, tendo em vista que as imprecisões inerentes à curva cota-área do reservatório e aos próprios métodos de estimativa dessas variáveis, aliadas à já mencionada pequena variação de cotas, não justificam tal refinamento.

As metodologias específicas adotadas para a estimativa de cada parcela do balanço hídrico são detalhadas no item 6.2.1.3 - Desenvolvimento.

Convém, ainda, destacar que todas as parcelas da equação anterior são “conhecidas” (efetivamente medidas, quanto possível, e estimadas nos demais casos). Não obstante as diversas fontes de erro e imprecisão, o objetivo do balanço hídrico ora apresentado é confrontar a variação do volume armazenado [ $\Delta S = S(t+1) - S(t)$ ] com o balanço de entradas e saídas do reservatório [ $I(t) - O(t)$ ] no período respectivo. Faz-se isso com o objetivo de se dispor de séries históricas confiáveis para as parcelas do balanço hídrico a serem utilizadas posteriormente no modelo de simulação desenvolvido.

A medida do ajuste das duas séries históricas,  $\Delta S$  e  $(I - O)$ , foi feita por meio do coeficiente de correlação do momento do produto Pearson ( $r$ ). Trata-se de índice adimensional situado entre -1 e 1, que reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados X e Y, ambos com n valores, conforme a Equação 6.2.

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (6.2)$$

### 6.2.1.3 - Desenvolvimento

Como primeira etapa para a realização do balanço hídrico, procedeu-se à delimitação da bacia hidrográfica do lago Paranoá, bem como das suas cinco sub-bacias, obtidas a partir das cartas topográficas do Sistema Cartográfico do DF (Codeplan) na escala 1:10.000. A delimitação também é apresentada na Figura 6.2.

As vazões medidas nos postos fluviométricos dos principais tributários foram transportadas do ponto de medida para a confluência com o Lago por relação linear entre as áreas de drenagem.

O posto fluviométrico do riacho Fundo Montante Zoológico operou até junho de 1994. Para permitir estender sua série até dezembro de 2002, foi feito estudo de correlação entre as vazões médias mensais desse posto e as dos postos do Bananal EPIA-003 e do Gama

Base Aérea, tendo sido maior a correlação do riacho Fundo com o Gama ( $R^2 = 0,815$ ). O estudo das correlações também serviu para a análise de consistência desses dados.

Com respeito à estação pluviométrica da ETE Brasília Norte, havia originalmente falhas nos registros para os meses de dezembro de 1997 e janeiro e fevereiro de 1998. Tais falhas foram preenchidas por meio do método do vetor regional (Hiez e Rancan, 1983), utilizando-se os dados pluviométricos das estações Santa Maria, ETE Brasília Sul e Barragem Paranoá.

Esse método consiste em gerar “uma série cronológica, sintética, de índices pluviométricos anuais ou mensais, oriundos da extração por um método de máxima verossimilhança da informação contida nos dados de um conjunto de estações agrupadas regionalmente”. Esses índices são únicos para a região em estudo e relacionam-se às alturas precipitadas em cada posto por meio dos respectivos coeficientes característicos. A precipitação  $P_{ij}$ , em um determinado período  $i$  em um posto  $j$ , é obtida pela Equação 6.3:

$$P_{ij} = L_i \cdot C_j \quad (6.3)$$

em que

$L_i$  = índice pluviométrico da região no período  $i$ ;

$C_j$  = coeficiente característico do posto  $j$ ;

$i$  = mês ou ano,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;

$j$  = posto,  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ;

Sendo  $\mathbf{P}$  a matriz de  $n$  observações ao longo do tempo em  $m$  estações pluviométricas da região, a Equação 6.3 pode ser reescrita como se segue:

$$\mathbf{P} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{C} \quad (6.3.a)$$

em que

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{C} = [C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_m]$$

Os vetores regional  $L$  e de coeficientes  $C$  são incógnitos, e, desse modo, o sistema de  $n \times m$  equações resultante é incompatível, devendo-se utilizar o método dos mínimos quadrados para a estimativa desses vetores. Define-se a matriz de erros  $E_{ij}$  como a diferença entre as séries histórica ( $P_{ij}$ ) e sintetizada ( $L_i \cdot C_j$ ), e busca-se minimizar a soma dos quadrados dos seus elementos. Para isso, parte-se de uma estimativa inicial do vetor regional  $L_i^{(1)}$  para se calcularem os  $C_j^{(1)}$ , conforme as Equações 6.4 e 6.5 a seguir. Obtidos os  $C_j^{(1)}$ , aplica-se a Equação 6.6 para calcular os  $L_i^{(2)}$ . Corrigem-se os  $C_j$  e recalculam-se os  $L_i$ , num processo iterativo que converge rapidamente.

$$L_i^{(1)} = \frac{1}{m} \sum_j P_{ij} \quad (6.4)$$

$$C_j^{(1)} = \frac{\sum_i L_i^{(1)} \cdot P_{ij}}{\sum_i (L_i^{(1)})^2} \quad (6.5)$$

$$L_i^{(2)} = \frac{\sum_j C_j^{(1)} \cdot P_{ij}}{\sum_j (C_j^{(1)})^2} \quad (6.6)$$

A precipitação direta sobre o espelho do lago Paranoá foi estimada por meio do método dos polígonos de Thiessen. Por esse método, obtém-se uma precipitação média a partir da ponderação dos totais precipitados em cada posto de uma dada região em função da área de influência de cada um. Os polígonos de Thiessen, sobrepostos à bacia do lago Paranoá e suas sub-bacias, são apresentados na Figura 6.3.

A ponderação das precipitações totais mensais dos postos pluviométricos, de acordo com as áreas de influência definidas pelos polígonos, conduziu à série de precipitações sobre o Lago, as quais foram transformadas em vazões médias mensais. Dessa forma, criou-se uma série correspondente às chuvas sobre o Lago.

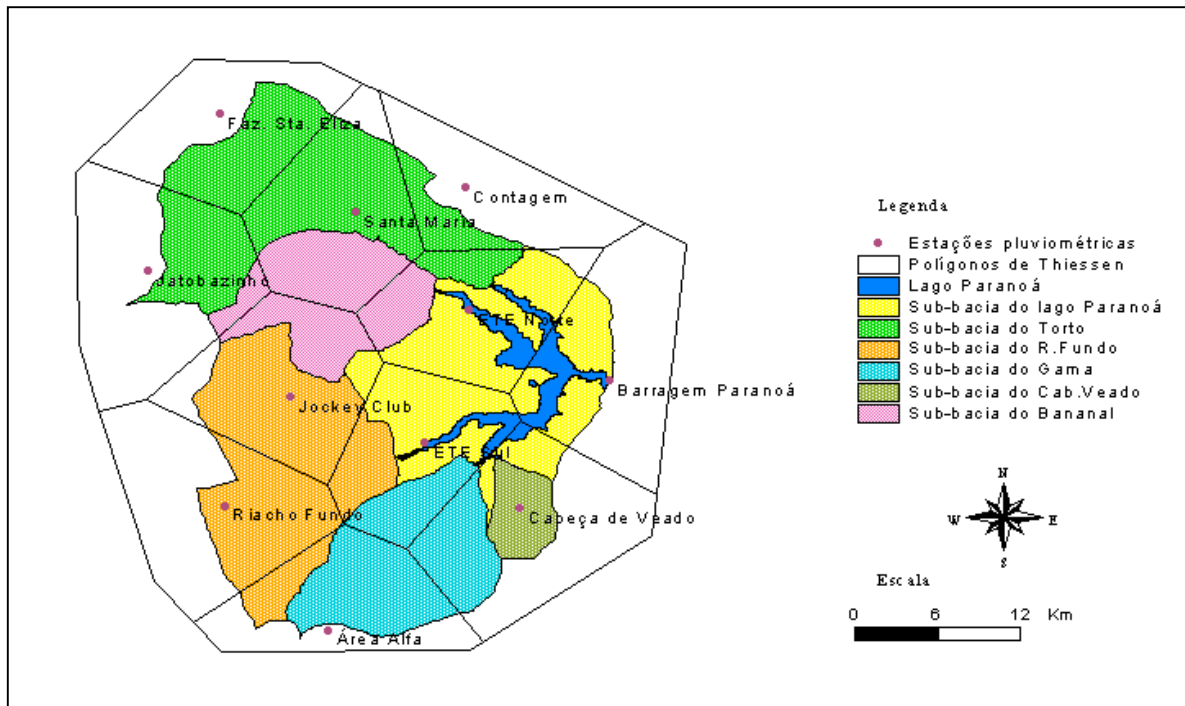


Figura 6.3 – Postos fluviométricos utilizados e respectivos polígonos de Thiessen.

No que se refere à estimativa da evaporação direta do espelho d'água do Lago, foram feitos estudos de correlação entre os dados da estação da UnB e os dados da estação da Embrapa Cerrados em Sobradinho, com vistas ao preenchimento das falhas, mas os resultados não foram satisfatórios. Dada a pequena variabilidade interanual entre os totais mensais evaporados, optou-se, então, por preencher as falhas com os valores médios mensais de longo período do total evaporado na estação da UnB, no período de 1972 a 1995. De modo análogo à precipitação direta, a evaporação direta do espelho d'água foi transformada em uma série de vazões médias mensais, adotando-se um coeficiente de 0,70.

A seguir, são apresentadas as metodologias adotadas para a quantificação das vazões de áreas não cobertas pelas estações fluviométricas mencionadas. As vazões médias mensais dessas áreas foram analisadas considerando-se as três parcelas seguintes:

- escoamento superficial afluente ao Lago oriundo dessas áreas;
- contribuição de águas servidas (para áreas não atendidas pelo sistema público de esgotamento sanitário);
- contribuição do lençol freático.

A parcela correspondente ao escoamento superficial foi estimada em função do total de precipitação, ponderado pelas áreas de influência dos postos pluviométricos.

No que diz respeito ao coeficiente de escoamento superficial, foram testadas duas abordagens. Na primeira, adotaram-se coeficientes constantes ao longo do ano, diferenciados em função das características das áreas de drenagem. Na segunda, os coeficientes de escoamento foram distintos tanto para as áreas de drenagem como para a época do ano, com vistas a considerar, nos meses secos, a parcela “perdida” para reposição de umidade do solo.

Para estimativa desses coeficientes, estudou-se o comportamento dos hidrogramas das bacias de drenagem dos postos fluviométricos do riacho Fundo e do Bananal, nos anos de 1980 e 2000, respectivamente. Separou-se a vazão do escoamento subterrâneo e calculou-se a diferença entre o escoamento no rio e o escoamento subterrâneo, que equivale à parcela da água precipitada que escoar na superfície. O coeficiente de escoamento foi obtido pela razão entre o total precipitado e o total escoado superficialmente, para os períodos de janeiro a abril, maio a agosto e setembro a dezembro, bem como para o ano todo. Os coeficientes de escoamento obtidos nesse estudo são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Valores de coeficiente de escoamento superficial estimados para as áreas de drenagem dos postos fluviométricos do riacho Fundo Montante Zôo e Bananal EPIA-003.

Posto fluviométrico (ano)	Jan - Abr	Mai - Ago	Set - Dez	Jan - Dez
Riacho Fundo (1980)	0,177	0,081	0,065	0,132
Bananal (2000)	0,045	0,035	0,060	0,052

Observa-se que a bacia de drenagem do posto do Bananal apresenta coeficientes de escoamento baixos e com pouca variação ao longo do ano, característica condizente com a predominância de cobertura vegetal natural (Parque Nacional de Brasília) e com o relevo de declividade relativamente baixa. Já a bacia do riacho Fundo, com maior ocupação urbana, apresenta comportamento diferente: coeficientes de escoamento maiores e distintos entre as épocas seca e úmida.

Na primeira abordagem, foram adotados coeficientes de escoamento de 0,10 para as áreas de que drenam para os braços do Torto e do Gama/Cabeça de Veado (caracterizadas por ocupação urbana de menor grau de impermeabilização); 0,16 para as áreas que drenam para os braços do riacho Fundo e do Bananal (caracterizados por maior impermeabilização); e 0,14 para a área de drenagem central (grau de impermeabilização

intermediário). Ressalta-se, porém, que os resultados obtidos com esses coeficientes são idênticos quando se simulou coeficiente de 0,14 para todas as áreas de drenagem. Os coeficientes de escoamento adotados na segunda abordagem, variáveis em função das áreas de drenagem e da época do ano, são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Coeficientes de escoamento adotados para estimativa da drenagem pluvial

Área de drenagem	Procedimento			
	1	2		
	Jan – Dez	Jan – Abr	Mai – Ago	Set – Dez
Braço do Torto	0,10	0,12	0,07	0,10
Braço do Bananal	0,16	0,18	0,08	0,12
Braço do riacho Fundo	0,16	0,18	0,10	0,12
Braço do Gama/C.Veado	0,10	0,12	0,07	0,10
Zona central	0,14	0,14	0,08	0,10

A parcela correspondente à contribuição natural do lençol freático, não englobando a infiltração de águas servidas, foi estimada como sendo proporcional às médias das mínimas vazões diárias específicas registradas em cada mês nos postos fluviométricos Bananal, Gama e riacho Fundo, escolhidos por refletirem as vazões naturais dos respectivos corpos d'água. A série de vazões mínimas do riacho Fundo foi estendida por correlação com os dados do Gama (a partir de 1994). Foi calculada a média das vazões específicas mínimas desses postos para cada mês, tendo sido esse valor utilizado como referência para representar a contribuição do freático da área não monitorada por postos fluviométricos.

Para fins de comparação, devido à imprecisão associada às estimativas da drenagem pluvial e do escoamento subterrâneo de base, foi feita regionalização, para a área central não monitorada, das vazões médias mensais dos tributários. Calculou-se a série média das vazões específicas médias mensais dos postos Bananal, riacho Fundo, Gama e Cabeça de Veado. Aos dados desse último posto, somaram-se as retiradas para abastecimento, feitas a fio d'água a montante do mesmo. A série média assim obtida foi multiplicada pela área de drenagem da sub-bacia central. O posto do Torto não foi considerado, por simplificação,



tendo em vista que seu regime é bastante alterado pelo reservatório de acumulação Santa Maria, a montante do posto.

A parcela correspondente à contribuição de águas servidas – para as áreas não cobertas por estações fluviométricas e não atendidas com sistema de coleta de esgoto – foi estimada considerando-se as respectivas vazões de água consumida para abastecimento e coeficiente de retorno de 0,80.

Por fim, ressalta-se que os dados mensais referentes às vazões efluentes das ETEs estão divididos em 2 períodos – 1979 a 1989 e 1992 a 2002 – e os dados de consumo de água pelas áreas não servidas por sistema coletivo de esgotos estão disponíveis somente a partir de 1994. Os dados faltantes foram estimados para permitir a contabilização do balanço hídrico no período 1979-2002. Com vistas a permitir comparações e análises quanto à precisão dos dados, no entanto, calcularam-se os coeficientes de Pearson para o período completo, bem como para os subperíodos 1992-2002 e 1994-2002.

Convém destacar que, apesar de parte do lago Paranoá se encontrar em domínio fissural, não foram consideradas como defluências do Lago as perdas por infiltração, pois se considerou que essa parcela seria pouco representativa no cômputo geral. Além disso, devido à pequena variação de níveis d'água do Lago, presume-se que seu valor não se altera significativamente ao longo do tempo e, portanto, sua não-consideração não resulta em grande erro. Também não foram levadas em conta as retiradas não autorizadas de água do Lago (poços ou bombas de captação direta para irrigação de jardins, por exemplo).

No que diz respeito à consideração do assoreamento do Lago, foram adotados dois procedimentos. No primeiro, utilizou-se somente a curva cota-volume mais recente, considerando-a constante ao longo dos anos anteriores. No outro, curvas intermediárias foram interpoladas linearmente entre a curva cota-volume mais recente, já mencionada, e aquela correspondente à topografia da bacia hidráulica antes da formação do Lago.

#### 6.2.1.4 - Resultados

Conforme relatado no capítulo anterior, foram utilizados diferentes procedimentos para a estimativa de parcelas do balanço hídrico do lago Paranoá. Apresenta-se, na Figura 6.4, o balanço hídrico  $[I(t) - O(t)]$  e a respectiva variação de volume  $[S(t + 1) - S(t)]$ , em valores mensais e para o período de 1979 a 2002, que resultaram no melhor ajuste entre as duas séries.

Como era de se esperar, as maiores discrepâncias entre as duas séries ocorrem entre os meses de dezembro a março, como pode ser observado na Figura 6.5. Acredita-se que isso se deva, em grande parte, à agregação inevitável dos efeitos das fontes de imprecisão associadas à precipitação – espacialização de dados de precipitações intensas mas de ocorrência localizada, metodologia adotada para a medição e a subsequente estimativa das vazões nos cursos d'água, medições de vazão efluente das ETEs com contribuição de águas pluviais, entre outras.

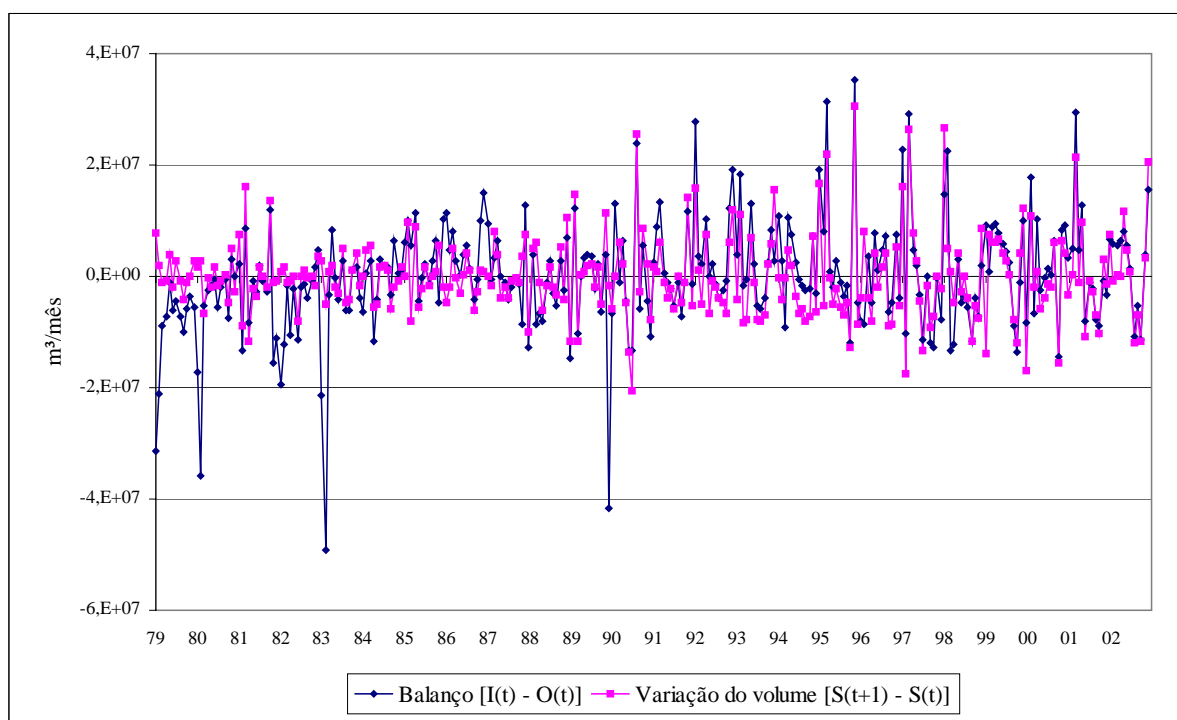


Figura 6.4 – Balanço hídrico do lago Paranoá, para o período de 1979 a 2002.

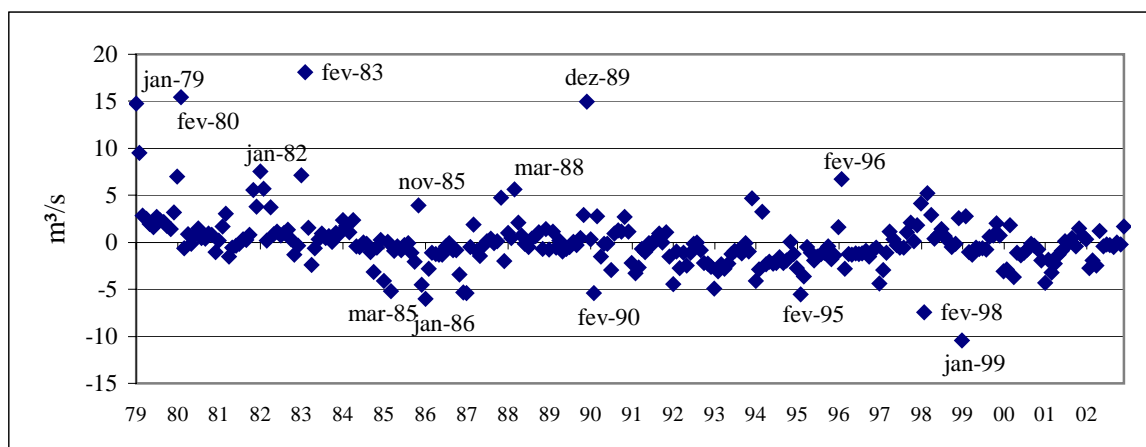


Figura 6.5 – Diferenças  $[S(t + 1) - S(t)] - [I(t) - O(t)]$ .

Os coeficientes de Pearson encontrados para as diferentes metodologias são apresentados na Tabela 6.4. Contrariando o esperado, o melhor ajuste foi obtido com a estimativa da drenagem urbana por meio de coeficientes invariáveis ao longo do ano, e com a aplicação da curva cota-volume mais recente para os anos anteriores, sem considerar o processo de assoreamento.

Tabela 6.4 – Coeficientes de Pearson entre as séries  $\Delta S$  e  $(I - O)$ .

Metodologia	Coeficiente de Pearson					
	1979 a 2002		1992 a 2002		1994 a 2002	
	Curva cota-volume					
	Constante <sup>3</sup>	Variável <sup>4</sup>	Constante <sup>3</sup>	Variável <sup>4</sup>	Constante <sup>3</sup>	Variável <sup>4</sup>
Dren.urbana <sup>1</sup>	0,64	0,63	<b>0,84</b>	0,81	<b>0,84</b>	0,82
Dren.urbana <sup>2</sup>	0,64	0,62	0,83	0,81	0,83	0,81
Regionalização	<b>0,65</b>	0,63	0,80	0,77	0,79	0,77

1: Coeficientes de escoamento diferentes em função da área de drenagem, constantes ao longo do ano (ver Tabela 6.3).

2: Coeficientes de escoamento diferentes em função da área de drenagem e da época do ano (ver Tabela 6.3).

3: Curva cota-volume mais recente (2003), considerada constante em todo o período.

4: Curvas cota-volume interpoladas linearmente entre a mais antiga e a mais recente, variada a cada 2 anos do período.

Apesar disso, é interessante notar a pequena diferença entre os valores obtidos a partir das distintas abordagens adotadas. A análise da ordem de magnitude das diferentes parcelas do balanço de entradas e saídas, apresentada na Figura 6.6, permite concluir que, em face das

muitas fontes de imprecisão, tentativas de refinar a estimativa de parcelas menos representativas se mostram pouco úteis.

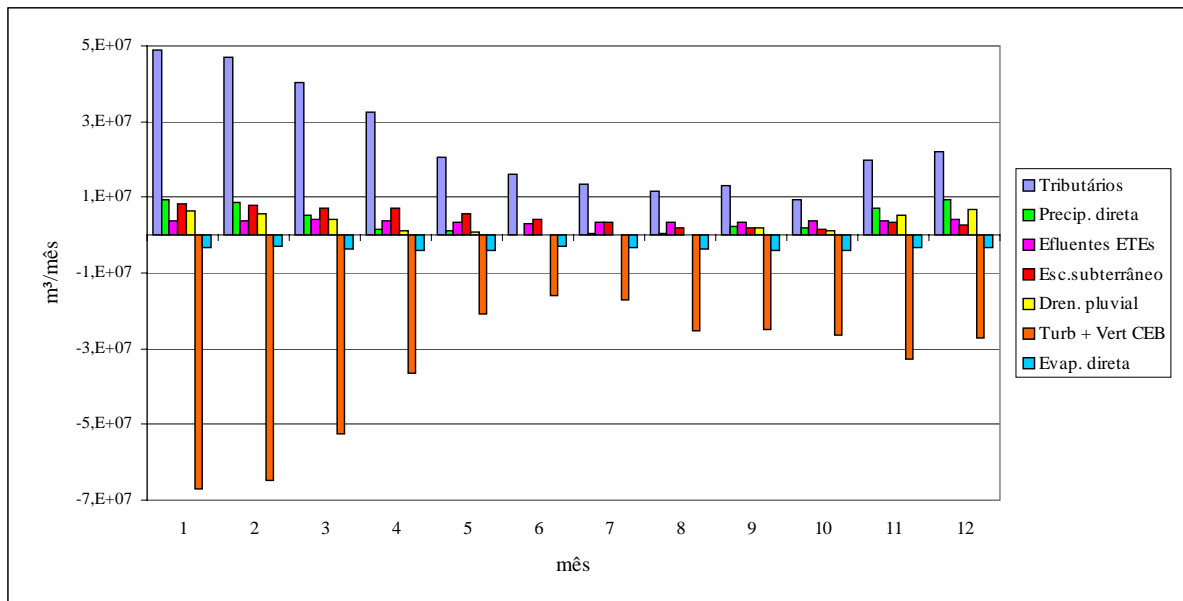


Figura 6.6 – Parcelas do balanço de entradas e saídas do lago Paranoá (ano de 2002).

É importante ressaltar que o coeficiente de Pearson entre as duas séries, tomando-se somente os meses secos (maio a outubro), foi de 0,88 para o período de 1979 a 2002, de 0,92 para 1992 a 2002, e de 0,93 de 1994 a 2002. Observa-se, ainda, que o ajuste das séries para os subperíodos mais recentes é melhor do que para o período completo, devido à maior disponibilidade de dados. Conclui-se, desse modo, que o refinamento do balanço hídrico depende de estudos específicos para permitir melhores estimativas das componentes afetadas pela precipitação e, com isso, reduzir os erros observados nos períodos chuvosos. No entanto, tal refinamento se mostrou pouco viável, tendo em vista o prazo de desenvolvimento da dissertação e as muitas fontes de erro e imprecisão inerentes a estudos dessa natureza e nessa escala. Como o potencial de conflitos entre os usos múltiplos da água tende a ser maior nos períodos secos, o ajuste obtido pode ser considerado satisfatório em vista dos objetivos da presente pesquisa.

Considerando-se pequena a possibilidade de que o nível de imprecisão associado às variáveis hidrológicas tenha variado significativamente ao longo dos anos, atribui-se, em parte, a maior imprecisão verificada de 1979 a 1992 a problemas de medição/estimativa das vazões “controladas” do sistema. Acredita-se, dessa forma, que um dos fatores que contribuíram para o pior ajuste das séries nesse subperíodo diz respeito a diferenças entre

as duas séries de vazões efluentes das ETEs, tendo em vista a reforma das mesmas e, conseqüentemente, a alteração de seus pontos de medição de vazão.

Nas Figuras 6.7 a 6.10, a seguir, apresentam-se os balanços hídricos médios de longo período para os anos de 1979 a 2002 e de 1992 a 2002, estimados a partir das séries que resultaram no melhor ajuste (Figura 6.4).

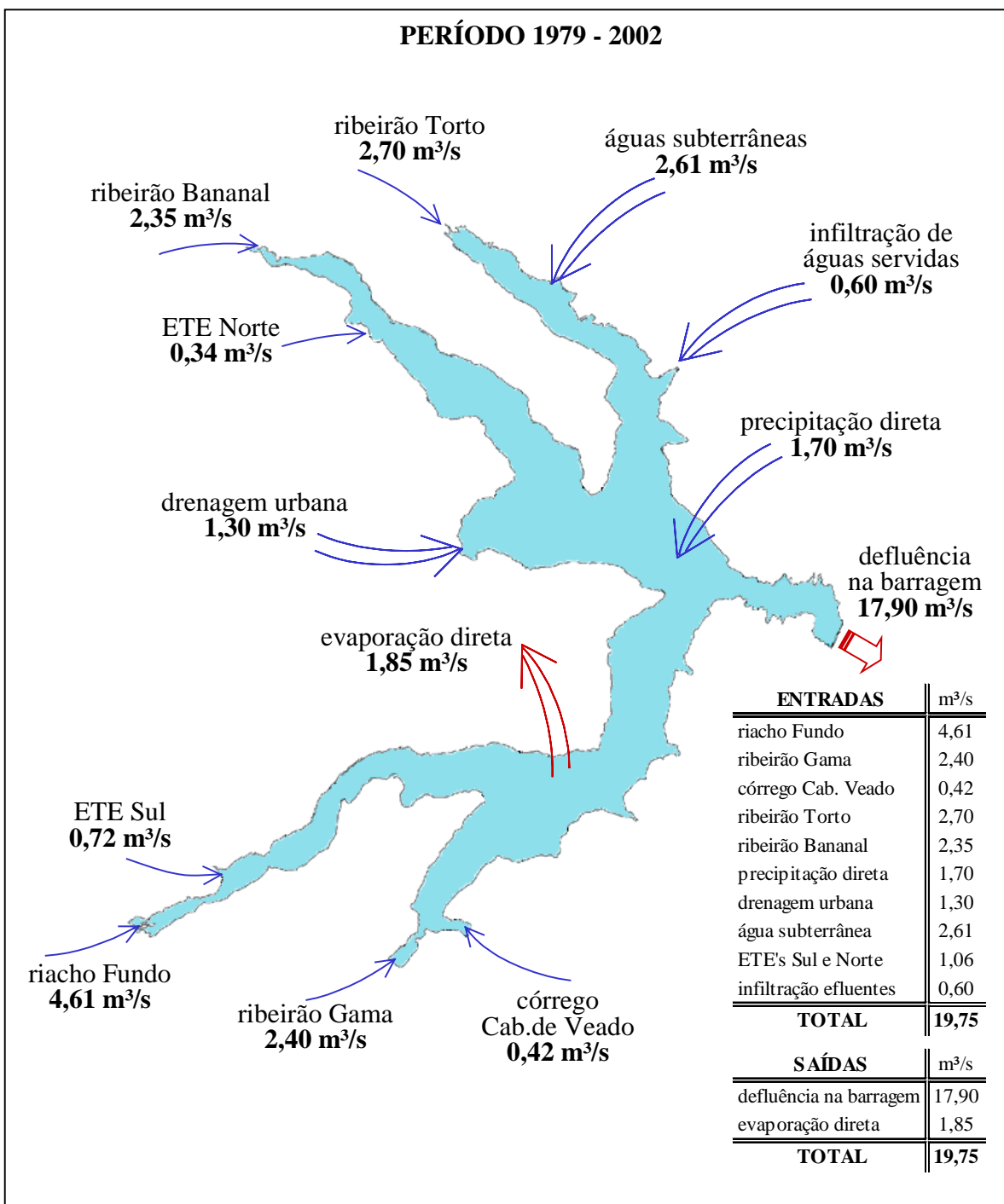


Figura 6.7 – Balanço hídrico de longo período (1979-2002) do lago Paranoá.

PERÍODO 1979 - 2002

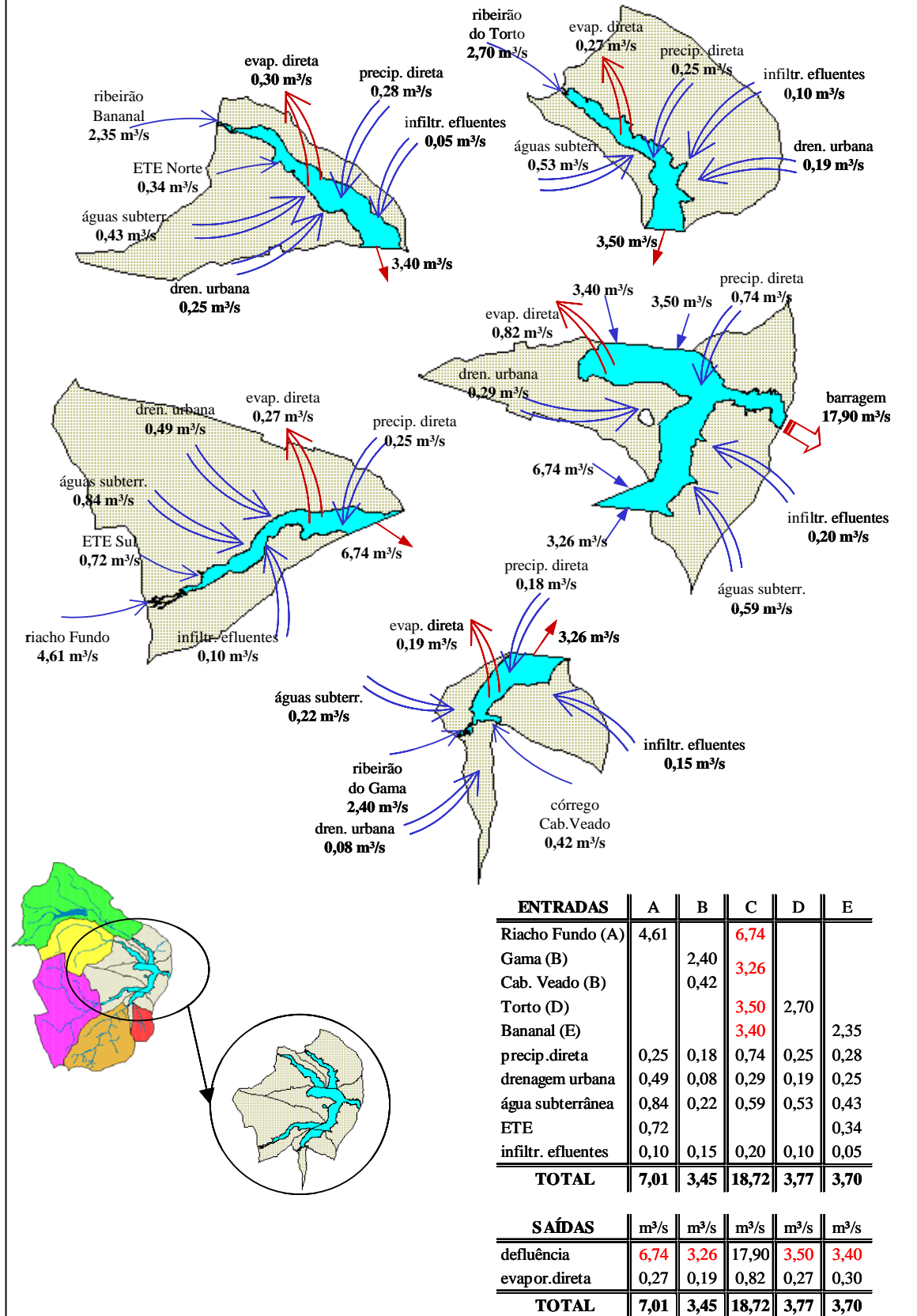


Figura 6.8 – Balanço hídrico de longo período (1979-2002) dos segmentos do lago Paranoá.

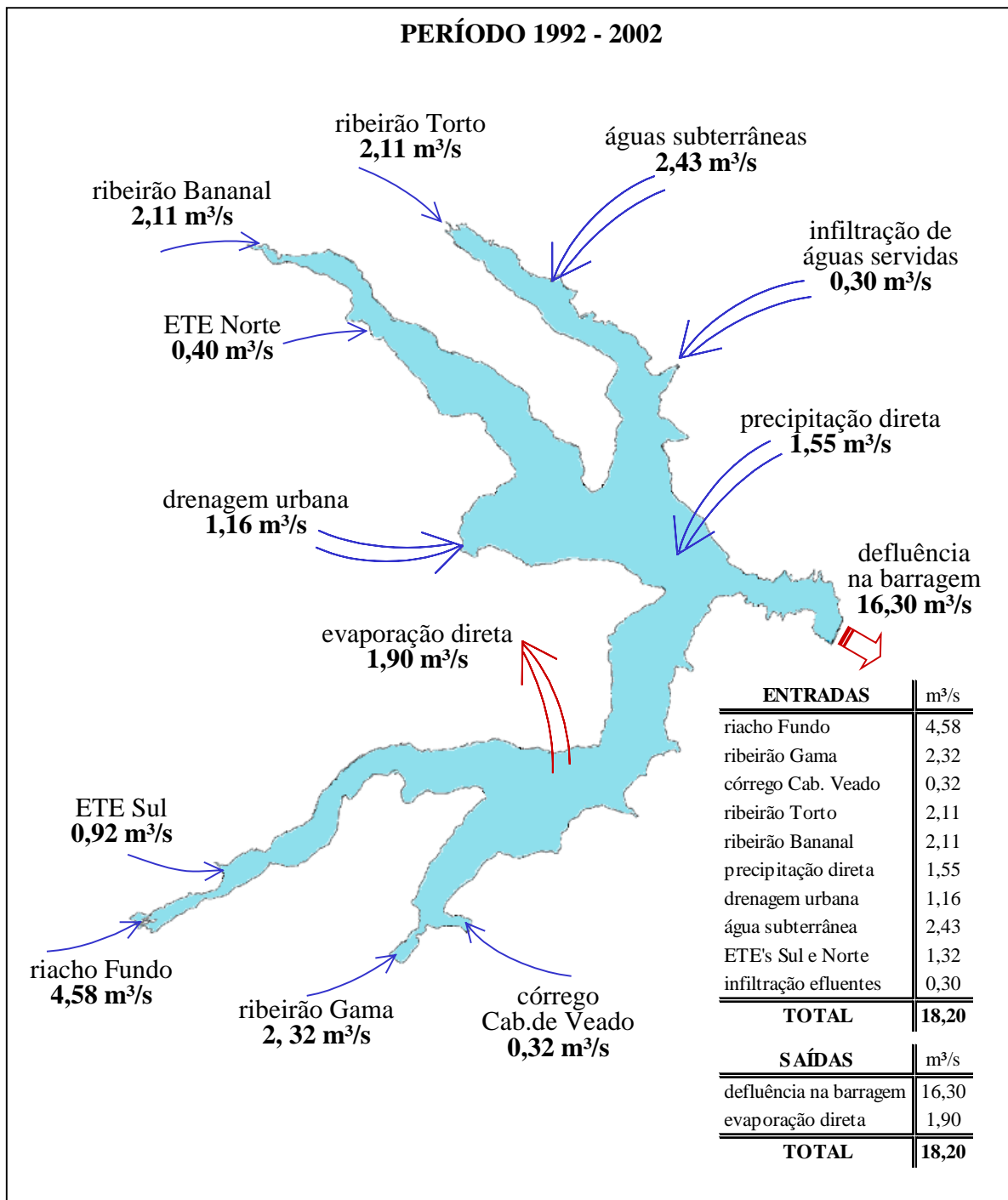


Figura 6.9 - Balanço hídrico de longo período (1992-2002) do lago Paranoá.

PERÍODO 1992 - 2002

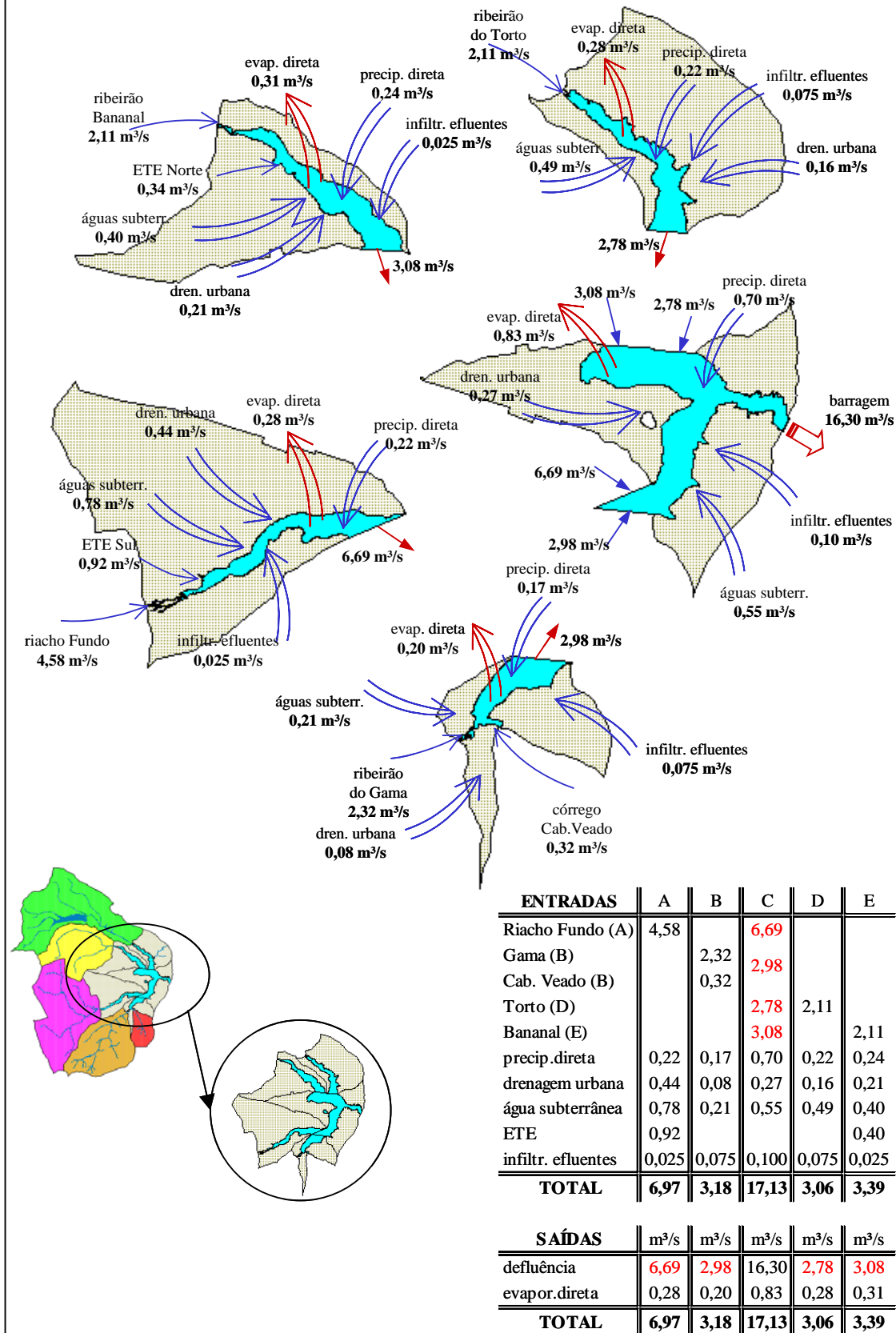


Figura 6.10 - Balanço hídrico de longo período (1992-2002) dos segmentos do lago Paranoá.



Pode-se observar que o balanço hídrico do período de 1992 a 2002, comparado ao do período de 1979 a 2002, apresenta menores afluências ao Lago e, conseqüentemente, menor defluência na barragem. De fato, conforme pode ser visualizado na Figura 6.11, os anos 1992-2002 apresentaram pluviometria média menor que a média de longo período, caracterizando-os como anos secos e, portanto, não representativos da variabilidade hidrológica regional. Já o período de 1979 a 2002 apresenta tanto anos mais chuvosos, como anos com pluviometria próxima à média de longo período, sendo mais adequado para avaliações em que se deve considerar a variabilidade hidrológica.

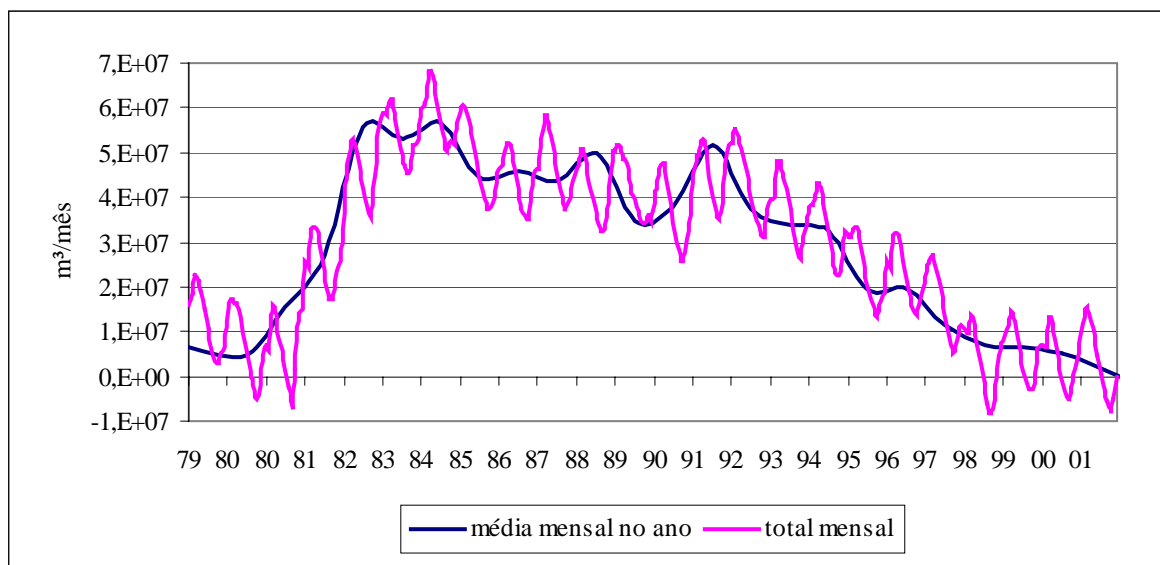


Figura 6.11 – Diferenças acumuladas entre a precipitação direta sobre o espelho d'água do Lago em cada período e a respectiva precipitação direta média de longo período.

### 6.2.2 - Tempo de residência hidráulica do lago Paranoá

A partir dos dados disponíveis, calculou-se o tempo de residência hidráulica do Lago nos períodos secos e chuvosos, apresentado na Figura 6.12. O interesse em se dispor desse dado reside no fato de que o tempo de residência hidráulica (ou, em outras palavras, o tempo de renovação da água) pode exercer influência significativa sobre a qualidade da água armazenada. No que se refere à eutrofização, por exemplo, apesar de as vazões afluentes introduzirem nutrientes que favorecem a proliferação vegetal, uma maior taxa de descarga pode reduzir o tempo disponível para o crescimento das plantas e causar menor acúmulo de biomassa (Tundisi, 2001).

Ressalta-se que é possível calcular o tempo de residência de um reservatório a partir das vazões afluentes ou das vazões efluentes. Entretanto, como recomenda Salas (1983), em reservatórios em que há diferenças entre os fluxos de entrada e saída, esse cálculo deve ser feito preferencialmente com as vazões de saída. Nesse caso, o tempo de residência hidráulica TR durante o período t pode ser calculado pela Equação 6.7, em que são desprezadas as perdas por evaporação devido à sua pouca representatividade em face da magnitude das vazões defluentes na barragem.

$$TR(t) = \frac{S(t)}{Q_{CEB}(t) + \Delta S(t)} \quad (6.7)$$

em que:

$Q_{CEB}(t)$  = vazão total defluente na barragem (turbinada+vertida) no período t;

$S(t)$  = armazenamento total durante o período t;

$\Delta S(t)$  = variação do armazenamento no período t.

Calculou-se, também, o tempo de residência marginal, apresentado na Figura 6.13, por meio da Equação 6.7, acima descrita, sendo mensal o período t. Os valores assim calculados são virtuais, pois não ocorrem de fato, mas servem para indicar a intensidade com que o tempo de residência tende a variar de um mês a outro.

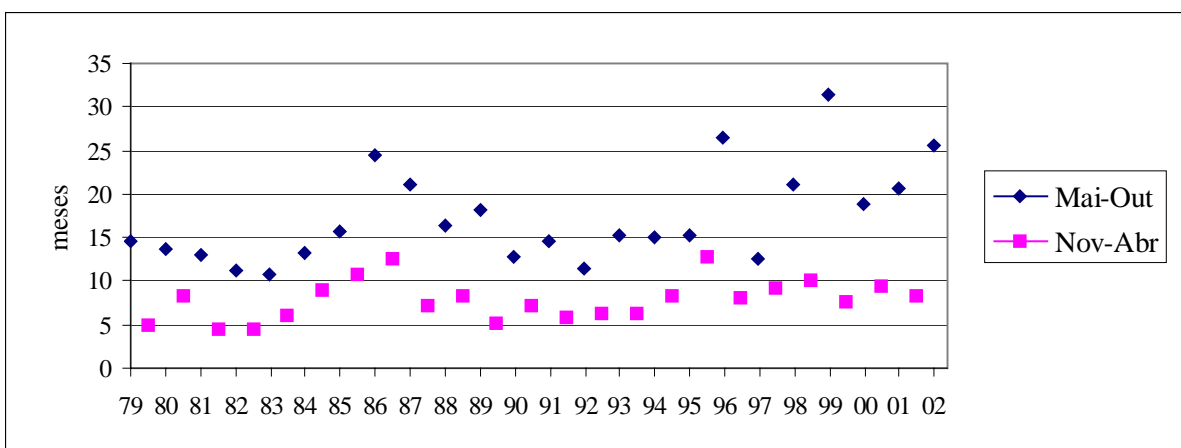


Figura 6.12 – Tempo de residência hidráulica do lago Paranoá.

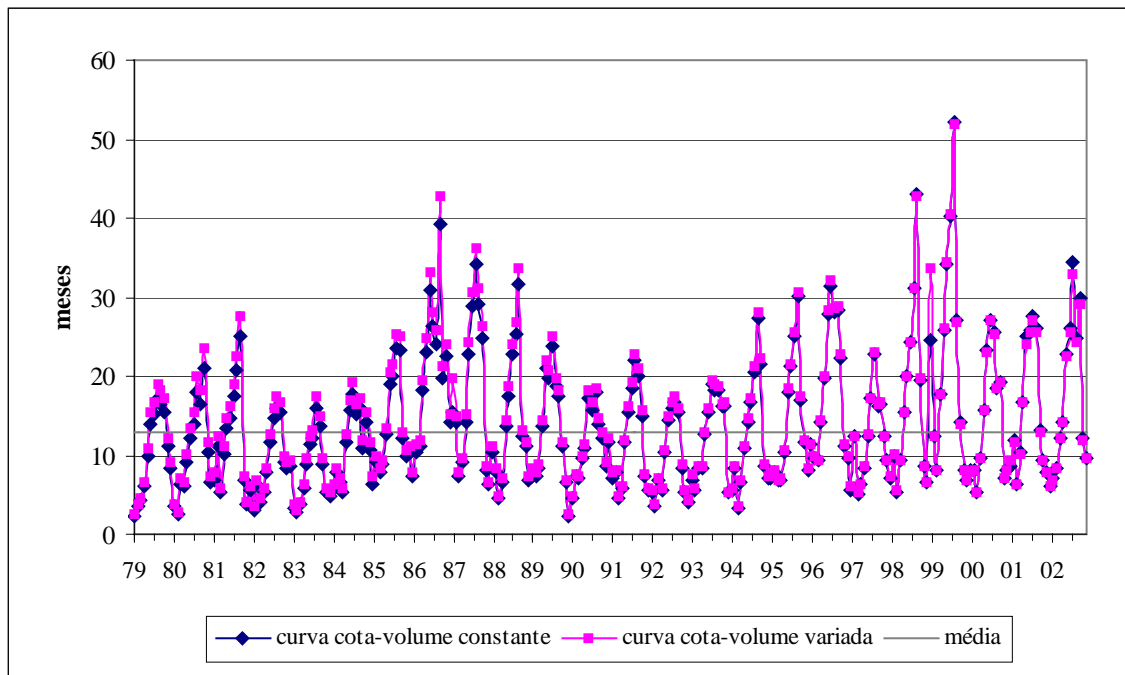


Figura 6.13 – Tempo de residência marginal mensal do lago Paranoá.

Observa-se que o tempo de residência do Lago apresenta tendência bastante variável ao longo do ano, passando de cerca de 5 a 10 meses na época chuvosa a até 17 a 40 meses na época seca. Tal comportamento é condizente com o padrão hidrometeorológico da região, com clara distinção entre o inverno seco e o verão chuvoso.

Verifica-se, também, que o deplecionamento do nível d'água do Lago feito no fim de 1998 foi seguido por período com tempo de residência atípico, atingindo valor marginal máximo de mais de 50 meses. Nos anos seguintes, esse máximo se estabilizou em torno do patamar de 30 meses. Pode-se depreender que o deplecionamento de 1998 se assemelhou a uma descarga do reservatório, originando um volume de espera que resultou no alto tempo de residência observado. Entretanto, ressalta-se que a essa ocorrência não está associada grande estagnação da água, pois o processo de enchimento promoveu boa circulação das massas de água, conforme será visto no item 6.3 – Evolução da qualidade da água do lago Paranoá.

Pode-se observar, ainda, que a desconsideração dos efeitos do assoreamento não ocasionou grande discrepância sobre o volume armazenado e, conseqüentemente, sobre o tempo de residência hidráulica do reservatório.

### 6.2.3 - Estudo de permanência de vazões

Estudou-se a permanência das vazões no lago Paranoá, a partir das vazões defluentes na barragem, para subsidiar análise posterior quanto a possíveis usos consuntivos do reservatório. Nesse caso, a curva de permanência obtida indica a probabilidade de se retirarem vazões iguais ou maiores a uma determinada vazão defluente.

As curvas de permanência foram determinadas para as vazões mensais totais mensais defluentes na barragem do lago Paranoá (turbinadas + vertidas), no período de 1979 a 2002, sendo apresentadas na Figura 6.14. Analisou-se a diferença da permanência das vazões entre o ano hidrológico completo (janeiro a dezembro) e somente os meses chuvosos (novembro a abril). Analisou-se, também, a permanência das vazões no período de 1999 a 2002, depois da modificação das regras operativas da barragem (Figura 6.15).

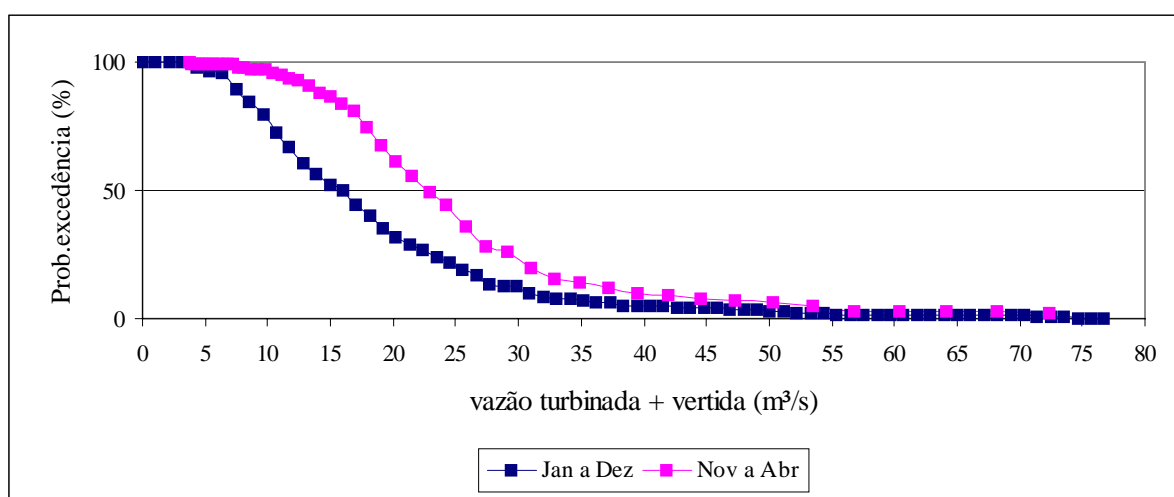


Figura 6.14 – Curvas de permanência das vazões defluentes totais (turbinadas + vertidas) na barragem do Paranoá, de 1979 a 2002.

A partir dos dados de 1979 a 2002, observa-se que vazões da ordem de 3,5 a 4 m<sup>3</sup>/s podem ser retiradas durante todo ano (cerca de 7,5 m<sup>3</sup>/s durante os meses chuvosos), com 99% de permanência, sem alterar o regime médio de níveis d'água no reservatório. Não há diferença significativa para o período de 1999 a 2002.

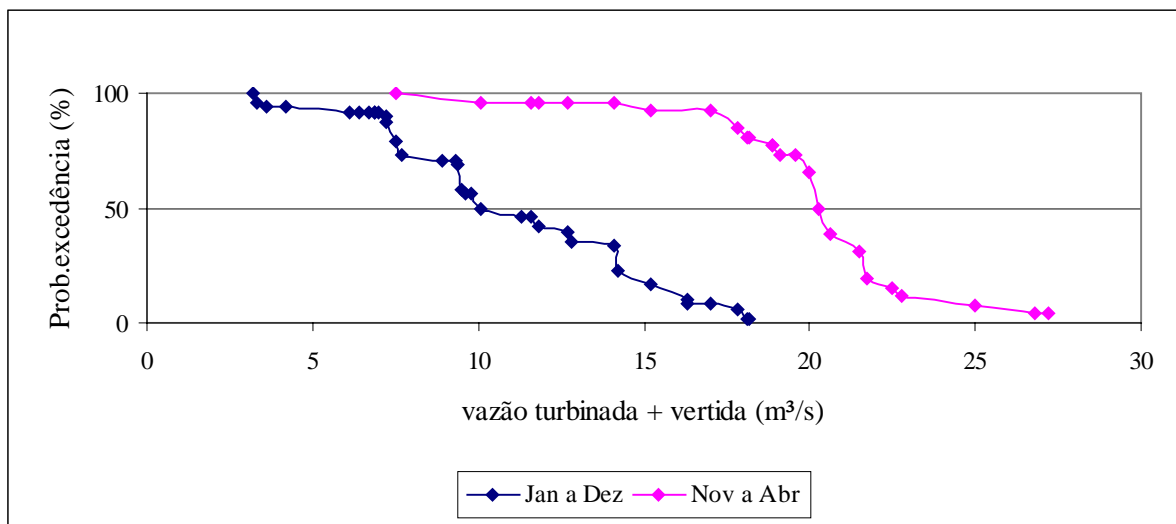


Figura 6.15 - Curvas de permanência das vazões defluentes totais (turbinadas + vertidas) na barragem do Paranoá, de 1999 a 2002.

### 6.3 - EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO LAGO PARANOÁ

O objetivo deste tópico é apresentar a evolução da qualidade da água do lago Paranoá ao longo dos últimos anos. Para isso, foram analisados dados referentes aos parâmetros de maior interesse – fósforo total, fitoplâncton e clorofila-a –, bem como as condições de balneabilidade do Lago. Pretendeu-se, também, identificar as possíveis causas para alterações das tendências observadas.

Os dados utilizados foram coletados pela Caesb, no âmbito de amplo programa de monitoramento da qualidade da água do Lago e de seus principais tributários.

#### 6.3.1 - Características morfológicas e hidrodinâmicas do lago Paranoá

Como visto anteriormente, pelo fato de o Lago ser utilizado prioritariamente para fins não-consuntivos, seu tempo de residência hidráulica acompanha a sazonalidade do regime pluviométrico, passando de valores da ordem de 5 a 10 meses na época chuvosa a 17 a 40 meses na estiagem.

No que diz respeito à sua morfologia, o Lago apresenta formato dendrítico, bem compartimentado. Devido a isso, os braços têm comportamentos independentes entre si. Além disso, apesar de desatualizada devido ao assoreamento, pode-se observar, na Carta

Isobática de 1979 (Figura 6.16), que os braços do Lago têm profundidades médias bem inferiores à da zona central. Isso resulta em comportamentos hidrodinâmicos (e, conseqüentemente, bioquímicos) diferentes entre os braços e o segmento central.

Prova disso é a ocorrência sistemática do fenômeno de estratificação térmica na zona central, com epilímnio, metalímnio e hipolímnio bem definidos. Conforme verificado por Vianna (2001), a circulação total da zona central tende a ocorrer nos meses de junho e julho, com pequenas variações de duração. Coincide, portanto, com o período mais seco e frio do ano. No restante do tempo, a zona central, geralmente, apresenta-se estratificada.

Nas Figuras 6.17 e 6.18, são apresentados gráficos de medições mensais de temperatura e de oxigênio dissolvido dos cinco segmentos do Lago. A análise desses dados, notadamente do oxigênio dissolvido, indica a ocorrência de períodos de estratificação vertical da coluna d'água também nos braços do Lago. Em tese, para se caracterizar, de fato, a ocorrência de estratificação vertical, seriam necessárias medições de temperatura ou densidade da água ao longo do dia e em diversas profundidades, monitoramento que não é feito no Lago. Por outro lado, a resistência à mistura entre diferentes camadas (em outras palavras, à desestratificação) é bastante grande em lagos quentes (Gomide, 1987). Por isso, acredita-se que também ocorre estratificação vertical nos braços, mas talvez com menor estabilidade que na zona central, pois a menor profundidade dificulta a formação das três camadas.

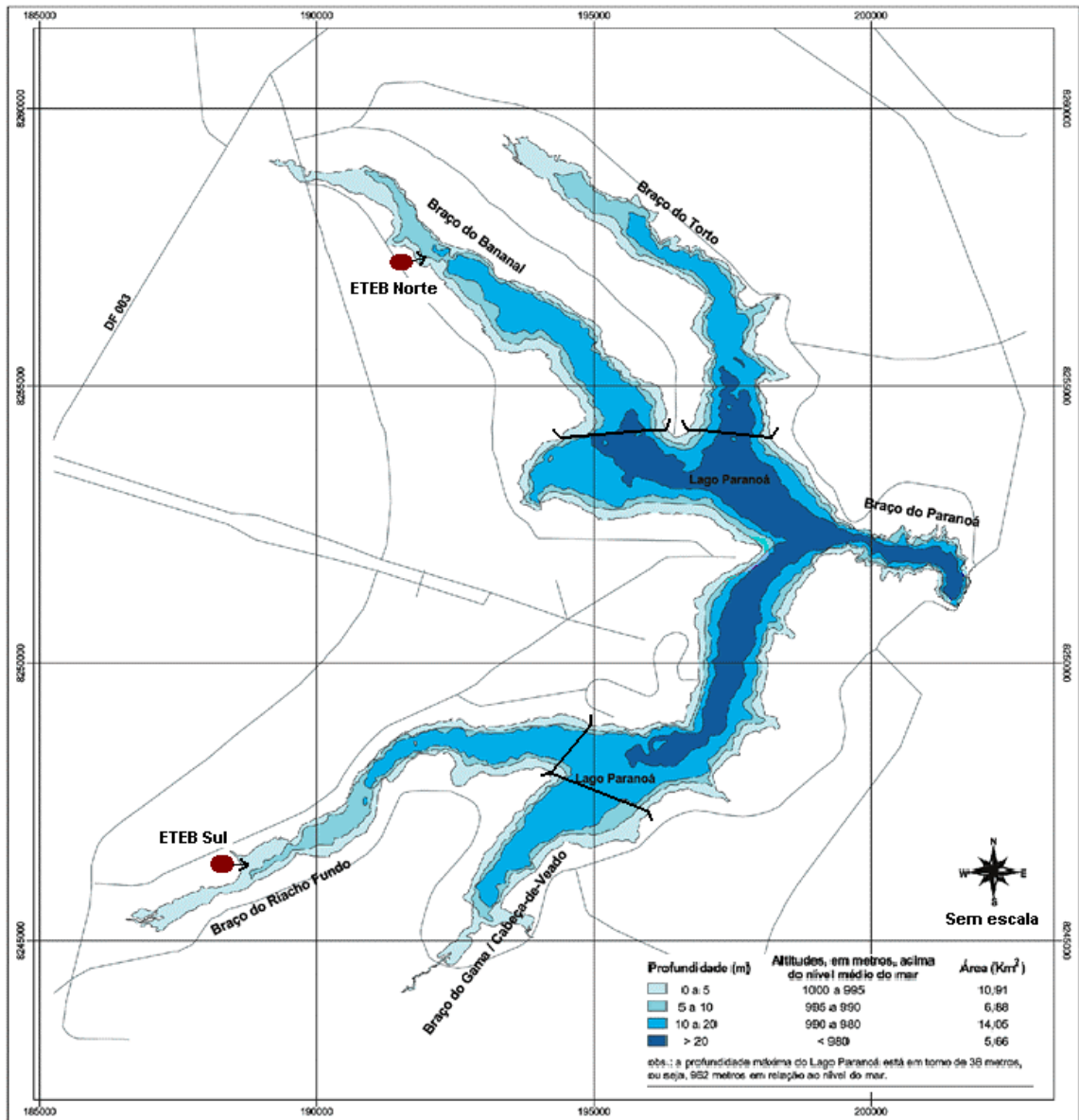


Figura 6.16 – Carta isobática do lago Paranoá (Semarh, 2001, adaptado).

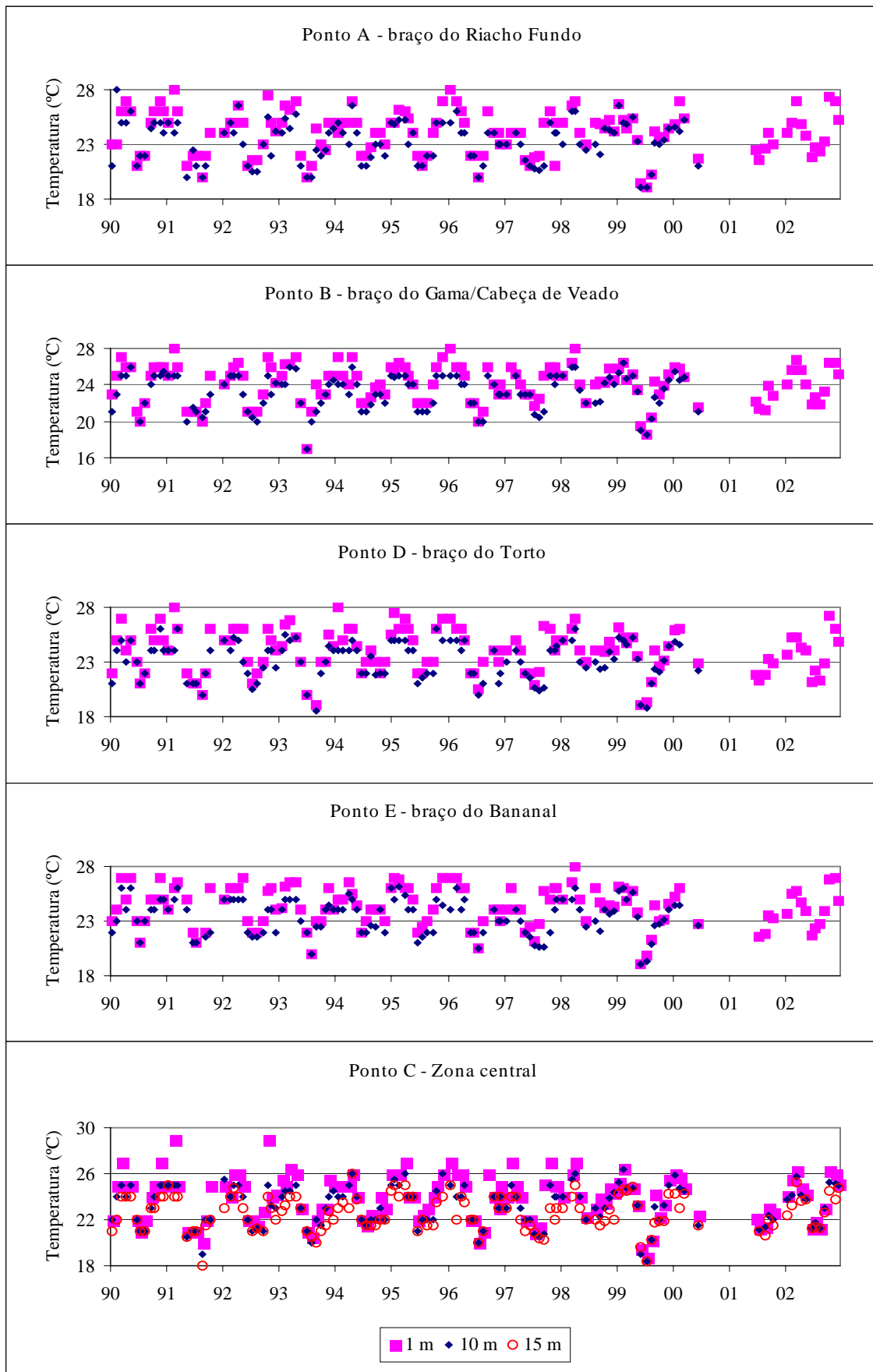


Figura 6.17 – Temperatura da água nos 5 segmentos do lago Paranoá (dados: Laboratório Central da Caesb)





### 6.3.2 - Apresentação e análise dos dados

Foram analisados os dados de qualidade da água do lago Paranoá nos cinco pontos de monitoramento representados na Figura 6.19. Concentrou-se a análise nos parâmetros fósforo total, fitoplâncton, clorofila-a e transparência, pois são indicadores da ocorrência de eutrofização. No que se refere ao fósforo total, também foram analisadas as contribuições pelos tributários do Lago. Além disso, foi feita avaliação qualitativa, pouco aprofundada, da condição de balneabilidade do Lago nos últimos anos.



Figura 6.19 – Pontos de monitoramento da qualidade da água do lago Paranoá pela Caesb (Burnett *et al.*, 2001).

Ao final, são apresentados resultados de testes estatísticos realizados para cada ponto e profundidade de amostragem, com o objetivo de identificar eventuais diferenças significativas entre as estações seca e chuvosa, ou, ainda, entre os períodos de circulação total e de estratificação térmica. Os parâmetros avaliados foram o fósforo total, o fitoplâncton, a clorofila-a e a transparência da água.

Antes de passar à análise dos dados de qualidade da água, convém lembrar que há dois marcos principais que resultaram em alterações significativas da qualidade da água do lago Paranoá. O primeiro deles foi a entrada em operação das ETEs Brasília Sul e Brasília

Norte, ampliadas e modificadas para remover nutrientes, em 1993 e 1994, respectivamente, e a subsequente interligação gradativa dos sistemas de esgotamento que antes lançavam resíduos sem tratamento ou com tratamento insuficiente nos corpos d'água (notadamente na bacia do riacho Fundo, que deságua no braço A). O segundo foi o deplecionamento do Lago feito no fim de 1998, que se assemelhou a uma descarga do reservatório, e a modificação do esquema de operação anual da UHE do Paranoá a partir de então. Segundo esse esquema operativo, a meta é que o nível d'água do Lago seja o menor possível ao fim do período seco, formando-se um volume de espera para o recebimento das águas de chuvas, e o maior possível no fim do período chuvoso, garantindo-se uma defluência mínima na estiagem subsequente. Aumenta-se, assim, a renovação e circulação das águas do Lago.

Com relação ao deplecionamento, convém mencionar que o mesmo é realizado por meio de turbinamento, e não por abertura de comportas de vertimento. A tomada d'água para a geração de energia se encontra a 988,00 metros, ou seja, a aproximadamente 12 metros de profundidade (com relação à cota 1000,00 do Lago). Como as profundidades do epilímnio e metalímnio na zona central são estimadas em 8 e 2 metros (Björk, 1979) e em 10 e 5 metros (Vianna, 2001), respectivamente, a tomada d'água provavelmente capta águas do hipolímnio, do metalímnio e também do epilímnio, devido às linhas de corrente formadas.

#### 6.3.2.1 - Fósforo total

As Figuras de 6.20 a 6.23 apresentam a evolução do fósforo total nos quatro braços do Lago, bem como nos respectivos tributários. A Figura 6.24 refere-se ao comportamento desse parâmetro na zona central (ponto C).

Observa-se, a partir de 1994, tendência clara de redução da concentração de fósforo total nos braços do riacho Fundo e do Bananal, que passaram a receber os efluentes tratados com remoção de fósforo nas ETEBs. Como reflexo, a mesma tendência é observada na zona central do Lago.

No braço do Gama/Cabeça de Veado (ponto B), observa-se leve tendência decrescente dos valores de fósforo total no período de 1996 a 1998. Não se dispõe de informações suficientes para indicar a causa desse processo, uma vez que não houve alteração

significativa do perfil da contribuição de fósforo pelo ribeirão do Gama e a interligação à ETE Sul dos esgotos de parte da área de drenagem direta desse braço se deu somente em 1998. Uma possibilidade a ser considerada, tendo em vista a localização do ponto de monitoramento na porção final do braço do Gama/Cabeça de Veado, é a de que haja interferência do braço do riacho Fundo, devido à maior velocidade média de fluxo da água – a vazão afluente média desse tributário é aproximadamente duas vezes a do Gama/Cabeça de Veado, sendo a seção de escoamento no braço A bem menor que no braço B.

A análise dos gráficos do braço do Torto também evidencia tendência decrescente do fósforo total a partir de 1996, porém menos significativa que a do braço do Gama/Cabeça de Veado. Levando-se em conta que não houve alteração no perfil da contribuição pelo tributário, esse comportamento pode estar associado à interligação à ETE Norte dos esgotos de parte da área de drenagem direta desse braço, ocorrida em 1997.

Até o fim de 1998, não se pôde identificar condição estabilizada da concentração de fósforo total nos braços e na zona central do Lago. Exceção, talvez, seja o braço do riacho Fundo, no qual, a partir de 1997, observa-se que a média dos valores de fósforo total a 1 metro e a 10 metros de profundidade se mantém praticamente no mesmo patamar. No entanto, em todos os braços e na zona central, observa-se, a partir de 1999, redução da concentração de fósforo total.

Feitas essas considerações, e tendo em vista os impactos sobre os outros indicadores de eutrofização, conforme é apresentado no item seguinte, pode-se concluir que a modificação do esquema operativo certamente teve efeitos positivos para a melhoria da qualidade da água no que se refere à concentração de fósforo total. No entanto, não se têm subsídios suficientes para inferir o quanto da redução da concentração de fósforo no período de 1999 em diante se atribui à modificação da operação e o quanto se deve à continuidade da tendência declinante devido à remoção de fósforo nas ETEBs.

Além disso, não se pode deixar de mencionar o programa de controle do aporte interno de fósforo por biomanipulação, realizado a partir de 1999, que também contribuiu para a alteração citada anteriormente. Conforme relatado por Burnett *et al.* (2001), promoveu-se, inicialmente, operação de remoção maciça de tilápias no braço do riacho Fundo, área de

grande suscetibilidade de mortandade de peixes. Atualmente, a pesca profissional nos braços do riacho Fundo e do Bananal é autorizada pelo Ibama.

Tendo em vista a utilização do Lago para recreação, é aceitável que esse se encontre em estado mesotrófico ou levemente eutrófico (von Sperling, 1996). Segundo estudos do Cepis – Centro Pan-americano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais – lagos tropicais com concentração de fósforo de  $40 \text{ mg/m}^3$  têm 75% de probabilidade de serem mesotróficos e 7% de serem eutróficos. Para reduzir a probabilidade de eutrofia a zero, esse limite cai para a faixa de 25 a  $30 \text{ mg/m}^3$ .

A análise da redução da concentração de fósforo na água do Lago permite concluir que a resposta do Lago às medidas de controle do aporte desse nutriente foi lenta. Para os braços do riacho Fundo e do Bananal, os mais críticos, a maioria dos valores fica abaixo de  $40 \text{ mg/m}^3$  somente nos quatro últimos anos. Já os braços do Gama e do Torto e a zona central, menos afetados pelos impactos da ocupação e das atividades urbanas, apresentam a maior parte dos valores abaixo desse valor-limite desde 1995/1996, sendo os valores consistentemente inferiores a  $25 \text{ mg/m}^3$  de 1999 em diante.

Entretanto, os gráficos da contribuição de fósforo total pelos tributários – principalmente nos ribeirões Gama e Torto – indicam tendência de aumento do aporte desse nutriente, notadamente nos últimos anos, devido, provavelmente, à ocupação mais intensa e, por vezes, desordenada das bacias de drenagem.

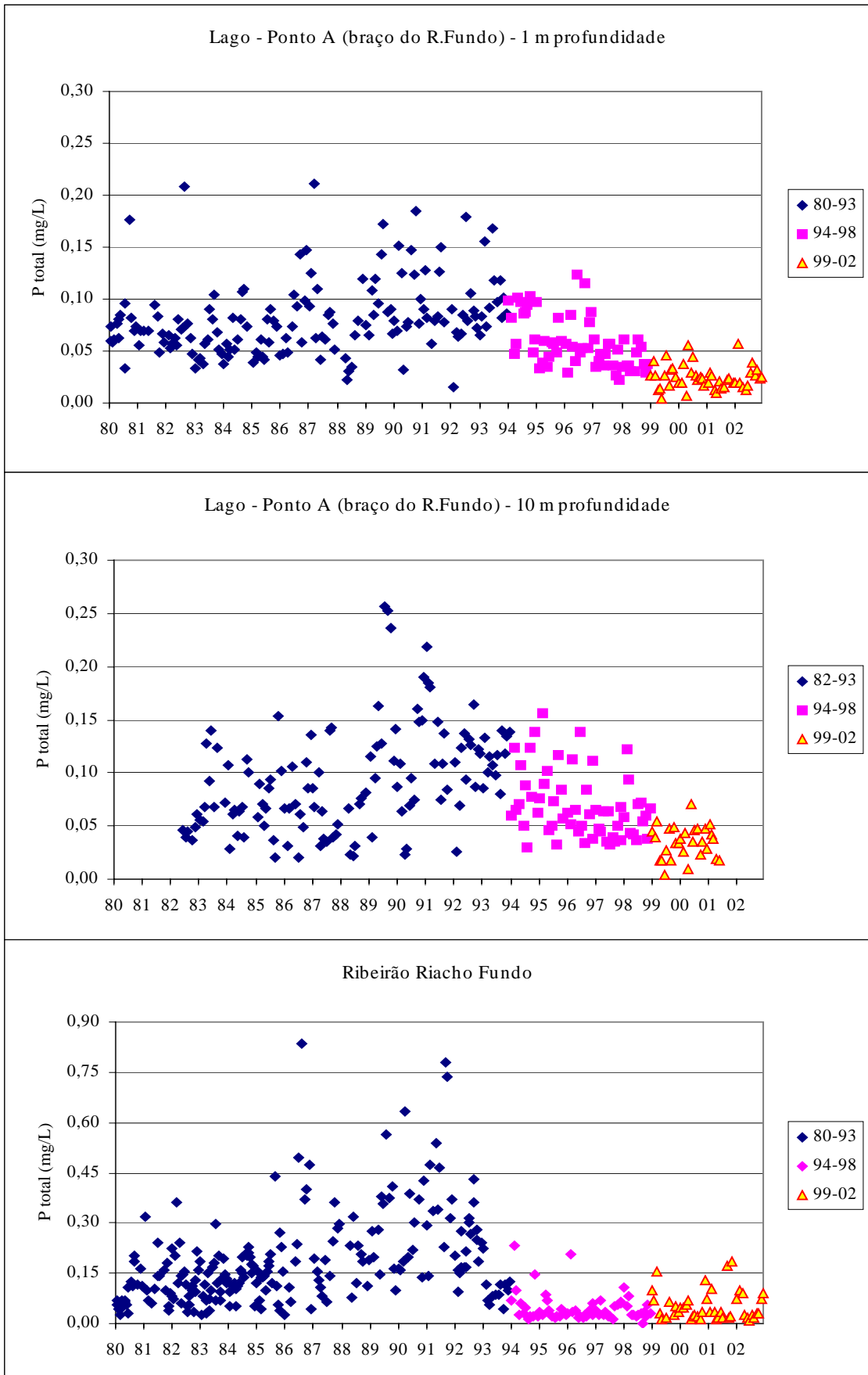


Figura 6.20 – Fósforo total no ponto A do Lago (braço do riacho Fundo) e no tributário riacho Fundo (dados: Laboratório Central da Caesb).

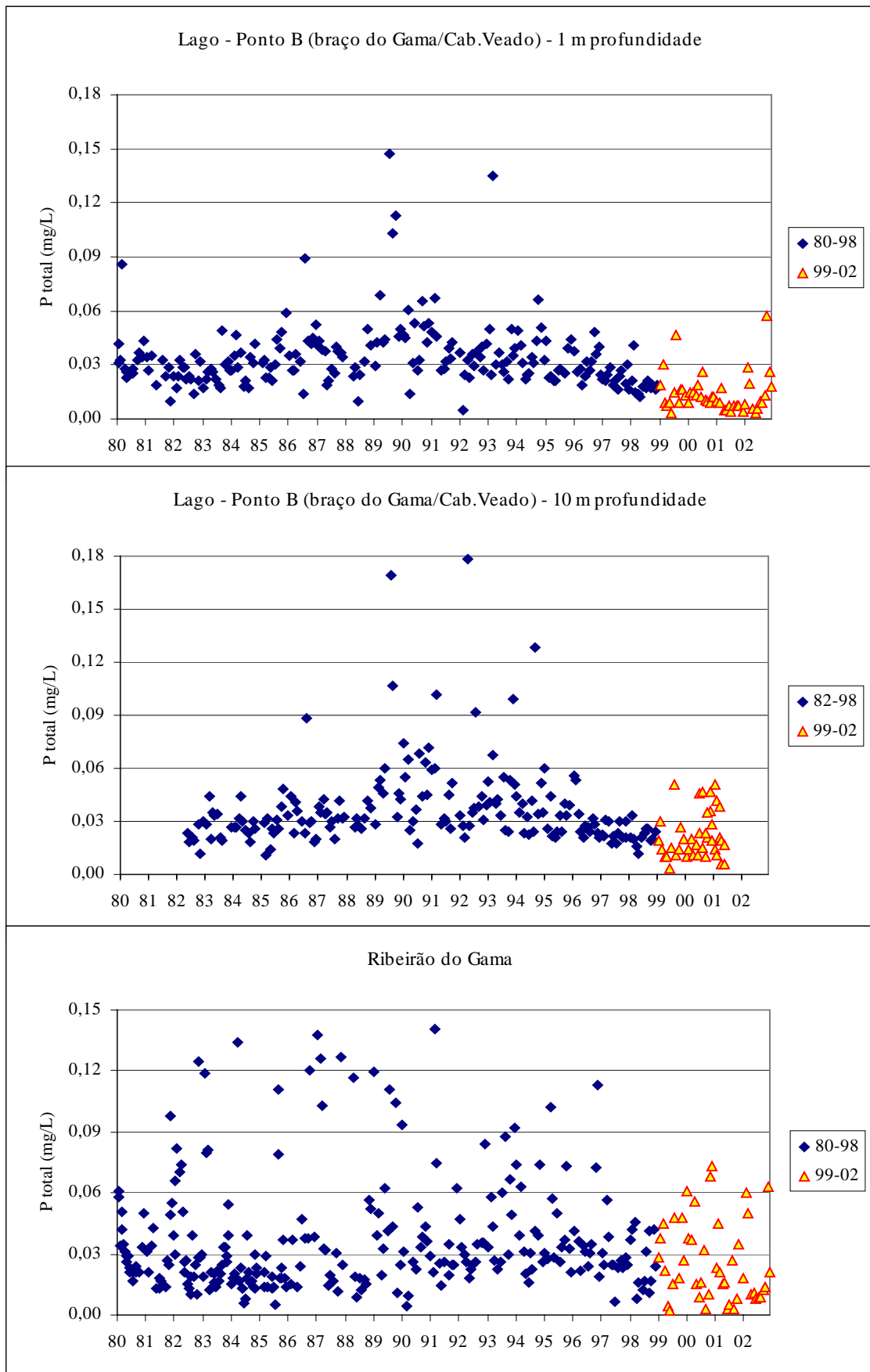


Figura 6.21 - Fósforo total no ponto B do Lago (braço do Gama/Cabeça de Veado) e no tributário ribeirão do Gama (dados: Laboratório Central da Caesb).

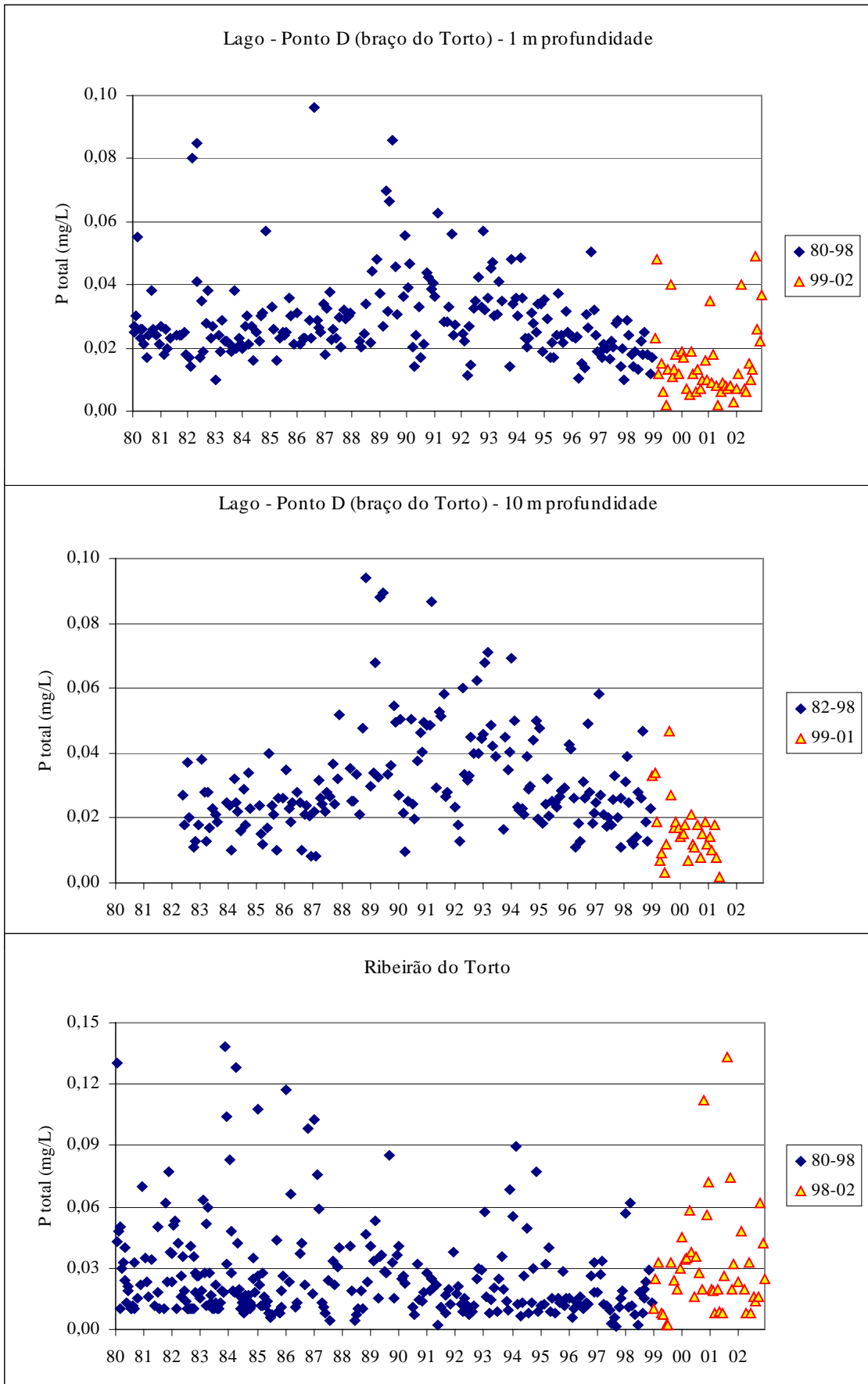


Figura 6.22 – Fósforo total no ponto D do Lago (braço do Torto) e no tributário ribeirão do Torto (dados: Laboratório Central da Caesb).



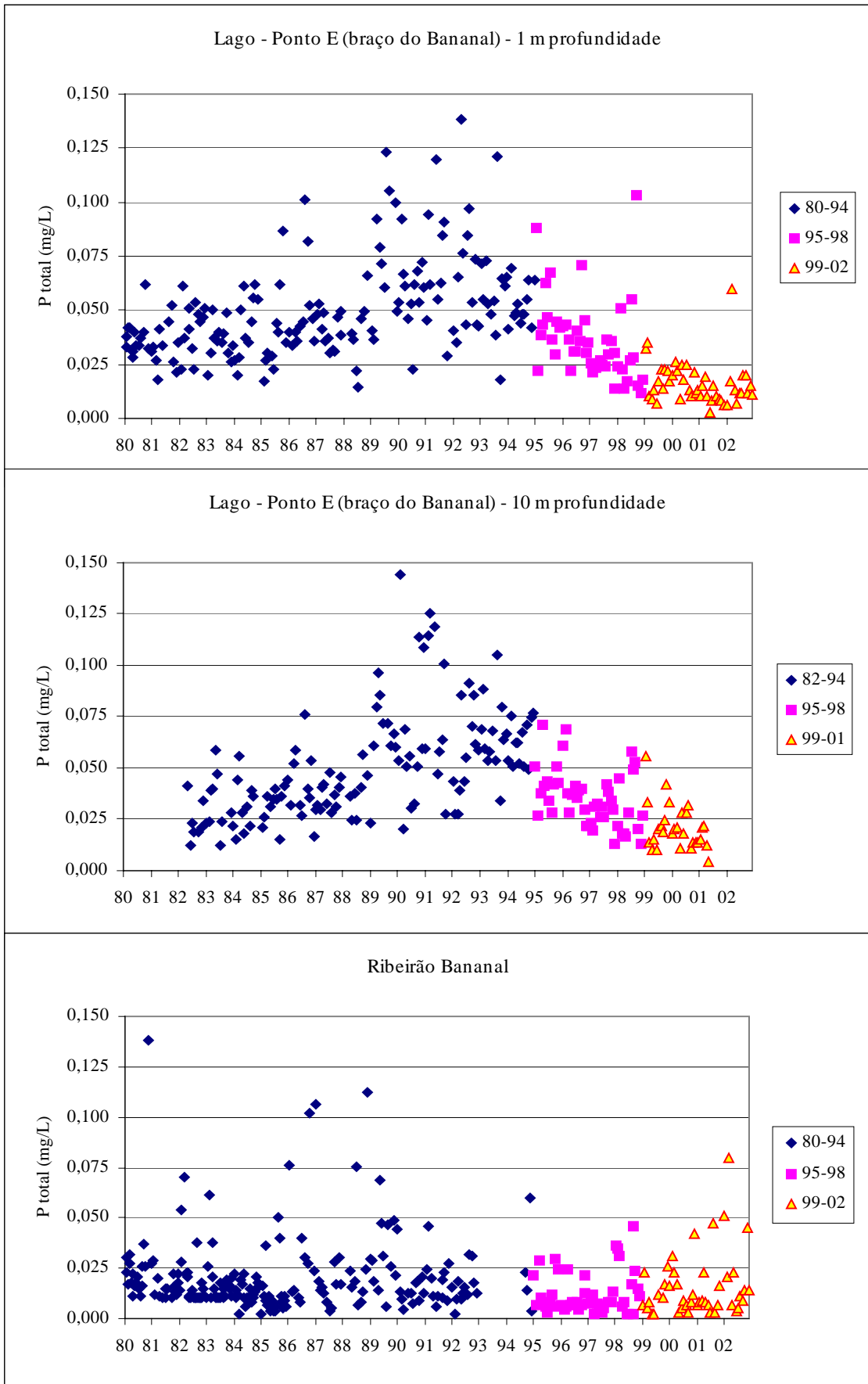


Figura 6.23 – Fósforo total no ponto E do Lago (braço do Bananal) e no tributário ribeirão Bananal (dados: Laboratório Central da Caesb).

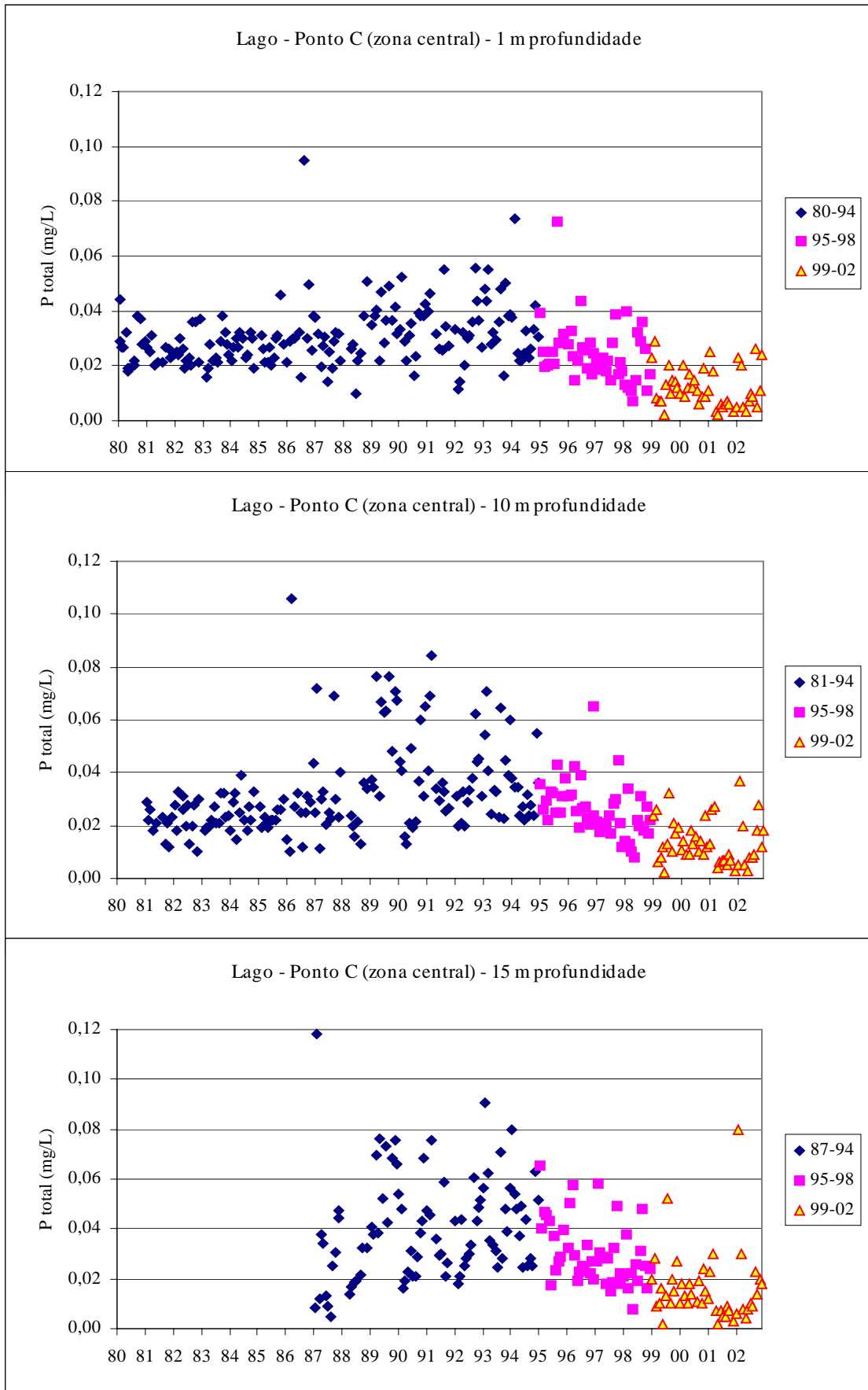


Figura 6.24 – Fósforo total no ponto C (zona central) do Lago (dados: Laboratório Central da Caesb).

### 6.3.2.2 - Fitoplâncton, clorofila-a e transparência

A Figura 6.25 apresenta as medidas de fitoplâncton e de clorofila-a nos cinco pontos de amostragem, a 1 metro de profundidade. A Figura 6.26 retrata a transparência medida a partir da superfície por disco Secchi.

A influência da remoção de nutrientes pelas ETEs nas concentrações de fitoplâncton é pouco evidenciada, ao passo que ocorreu redução relativa de clorofila-a, sugerindo que esse indicador pode não refletir adequadamente o grau de produtividade primária do Lago, a depender do tipo de alga predominante. De fato, conforme assinala Salas (1983), a correlação entre clorofila-a e biomassa pode ser muito variável, dependendo de fatores ambientais e da espécie de algas, entre outros.

O deplecionamento feito em 1998 e a posterior modificação da regra operativa do Lago, por sua vez, resultaram em drástica queda dos valores de fitoplâncton e de clorofila-a e na manutenção desses valores baixos. Isso se refletiu em aumento da transparência, pois boa parte da turbidez se deve à presença de algas na água.

Acredita-se que a primeira manobra do deplecionamento descarregou para jusante águas com grande concentração de biomassa algal, e que a modificação subsequente do esquema operativo do Lago tenha contribuído, desde então, para a manutenção da boa qualidade observada devido à maior renovação da água armazenada. Vianna (2001) verificou que, em 1999, ocorreu período de circulação total com duração atípica (abril a agosto), provavelmente devido ao deplecionamento do fim de 1998. É possível que esse fato, associado à redução na concentração de fósforo total, tenha sido o responsável pela substituição observada das algas azuis, que dominavam a comunidade fitoplanctônica do Lago, por outras espécies de algas verdes, amarelas e flageladas (Burnett *et al.*, 2001).

Vale mencionar que, desde 1980, é feito controle de floração de algas azuis por meio da adição de sulfato de cobre nas áreas mais comprometidas. O período de 1991 a 1993 foi o mais crítico, tendo sido aplicado algicida nos braços do riacho Fundo e do Bananal, na área central e em grande parte do braço do Gama (Burnett *et al.*, 2001). A partir de 1999, como esperado, reduziram-se bastante tanto as ocasiões como as áreas em que foi necessário adicionar o algicida.

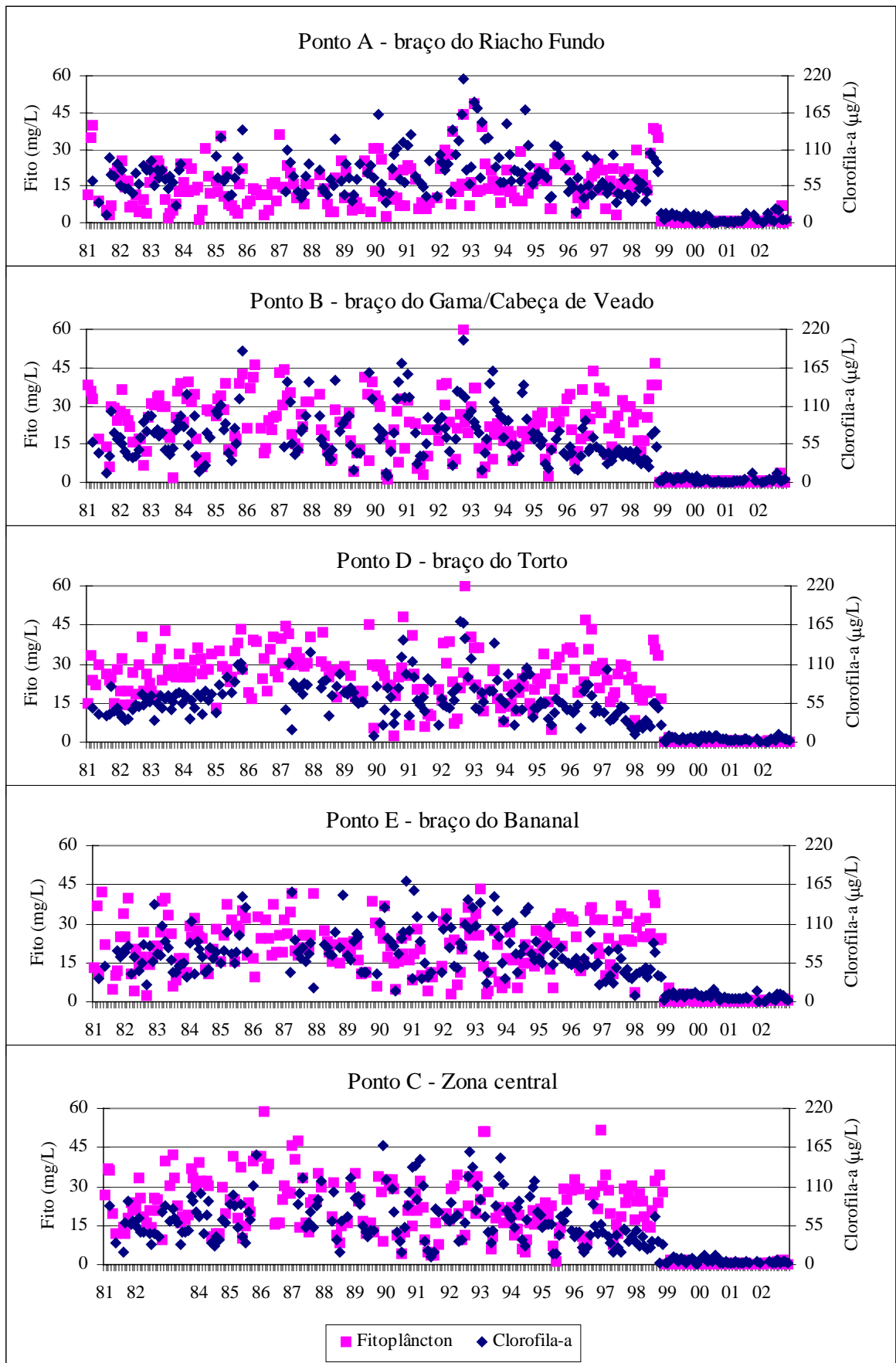


Figura 6.25 – Fitoplâncton e clorofila-a nos 5 segmentos do lago Paranoá (dados: Laboratório Central da Caesb).

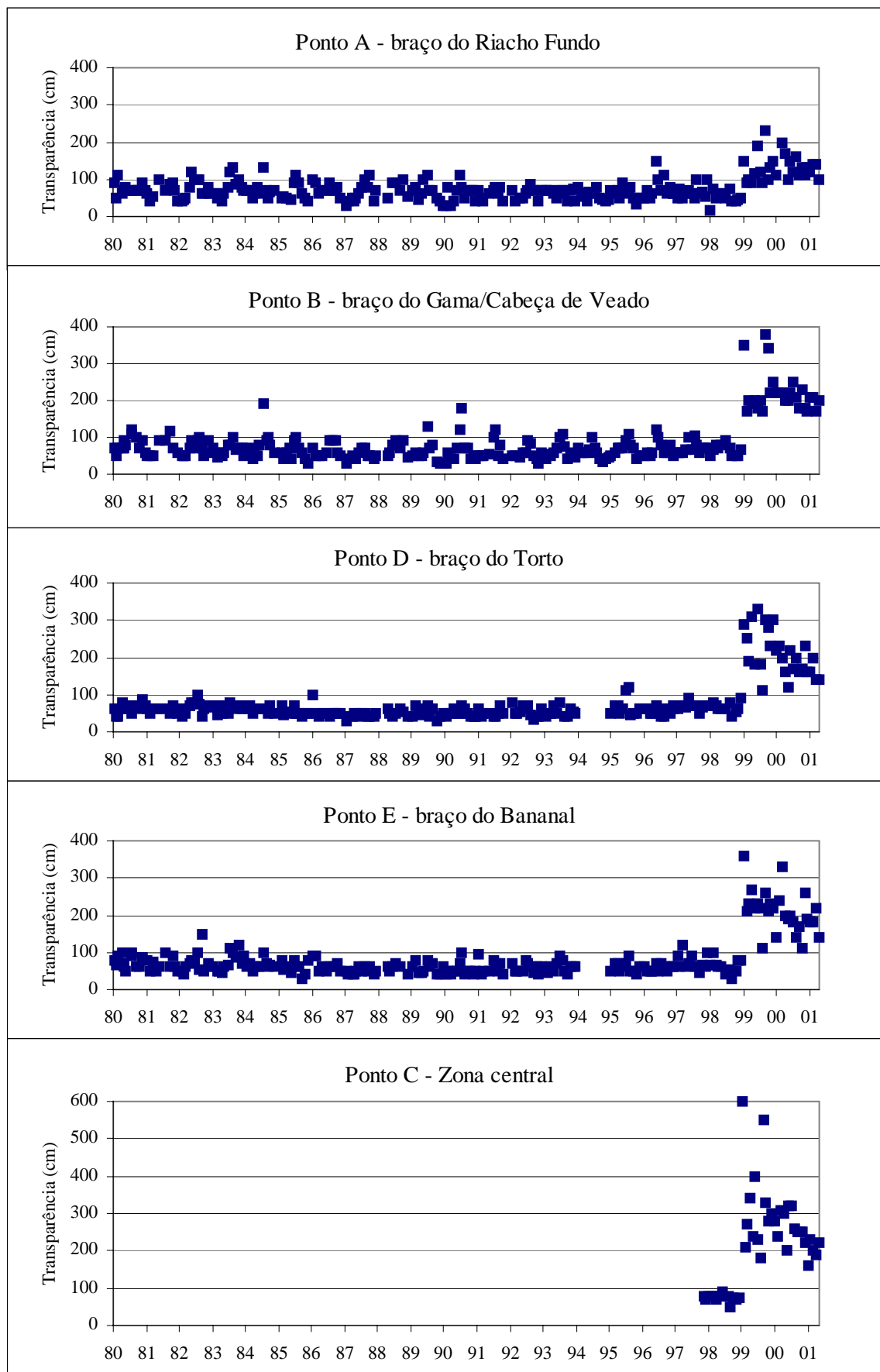


Figura 6.26 – Transparência da água nos 5 segmentos do lago Paranoá (dados: Laboratório Central da Caesb).

### 6.3.2.3 - Balneabilidade

Na Tabela 6.5, são apresentados os dados da balneabilidade semanal ao longo dos anos de 1998 e 2001, respectivamente. Os pontos monitorados são apresentados na Figura 6.27. Análise visual das tabelas é suficiente para perceber que, a menos de alguns locais recorrentemente problemáticos (como os braços do riacho Fundo e do Bananal e a baía do Iate Clube), o período de estiagem (maio a setembro) é caracterizado por condições de muito boas a excelentes de balneabilidade. Por outro lado, correspondem ao período chuvoso as ocorrências mais frequentes de condições insatisfatórias ou impróprias de balneabilidade.

### 6.3.2.4 - Testes estatísticos

Com o intuito de se verificar a hipótese de diferença estatística entre as épocas seca e chuvosa, foi realizado o teste estatístico “t” de Student ( $P < 0,05$ ) para cada ponto e profundidade de amostragem. Análise gráfica dos dados anteriores a 1999 indica que ainda não havia sido atingido estado de equilíbrio no sistema, o que inviabiliza a consideração dos dados desse período em estudos estatísticos desse tipo.

Dessa forma, foram utilizadas as séries de dados de 1999 a 2002 de fósforo total, fitoplâncton, clorofila-a e transparência. Separaram-se os dados de meses chuvosos e de meses secos, em três tentativas distintas e sucessivas:

- outubro a março e abril a setembro;
- novembro a abril e maio a outubro (defasando os períodos em 1 mês); e
- novembro a fevereiro e maio a agosto (retirando-se os meses de transição).

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.6. Como esperado, há diferença estatística entre os períodos seco e chuvoso, ou entre os períodos de mistura completa e de estratificação vertical – principalmente de novembro a fevereiro e de maio a agosto – somente na zona central, para as concentrações de fósforo total, fitoplâncton e clorofila-a. Com relação à clorofila-a, verifica-se que apresenta comportamento diferente do fitoplâncton para alguns pontos e profundidades, o que vem confirmar a observação feita no item 3.2. Quanto à transparência, não se observou diferença entre os períodos analisados para nenhum dos cinco pontos.



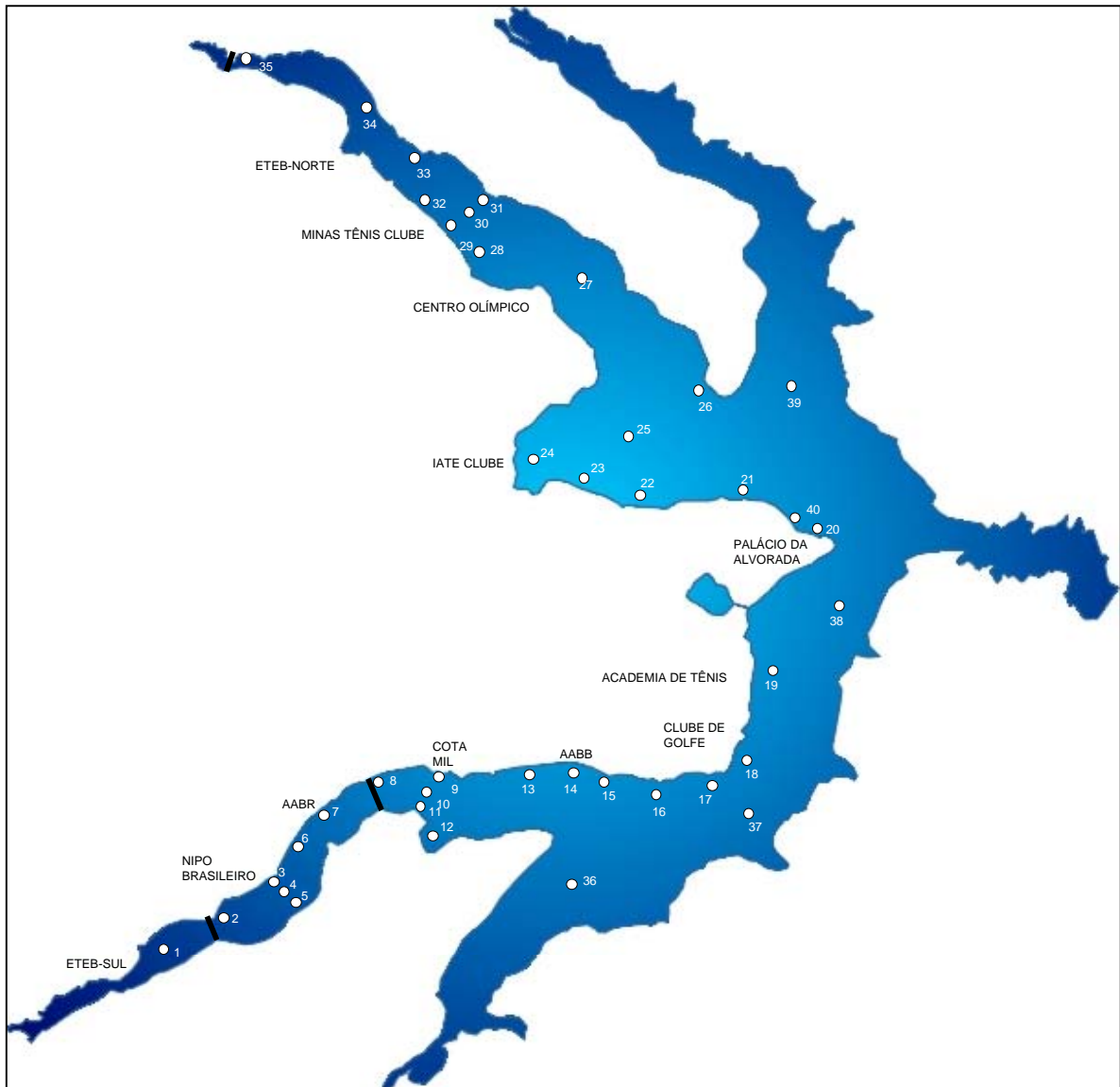


Figura 6.27 – Localização dos pontos de coleta do programa monitoramento da balneabilidade do lago Paranoá, realizado pela Caesb.



Tabela 6.6 – Resultados do teste “t” de Student aplicado aos dados de 1999 a 2002.

	Ponto/Profund.	Períodos são estatisticamente diferentes (P<0,05) ?		
		Out-Mar X Abr-Set	Nov-Abr X Mai-Out	Nov-Fev X Mai-Ago
Fósforo total	A5 – 1 m	NÃO	NÃO	NÃO
	A5 – 10 m	SIM	NÃO	NÃO
	B – 1 m	NÃO	NÃO	NÃO
	B – 10 m	NÃO	NÃO	NÃO
	C – 1 m	SIM	SIM	SIM
	C – 10 m	SIM	NÃO	SIM
	C – 15 m	SIM	NÃO*	SIM
	C – 20 m	SIM	SIM	SIM
	C – 1 m fundo	SIM	SIM	SIM
	D – 1 m	NÃO	NÃO	NÃO
	D – 10 m	NÃO	NÃO	NÃO
	E3 – 1 m	NÃO	NÃO	NÃO
	E3 – 10 m	NÃO	NÃO	NÃO
	Transpar.	A5	NÃO	NÃO
B		NÃO	NÃO	NÃO
C		NÃO	NÃO	NÃO
D		NÃO	NÃO	NÃO
E3		NÃO	NÃO	NÃO
Fitoplâncton	A5 – 1 m	NÃO	NÃO*	NÃO*
	A5 – 10 m	NÃO*	NÃO*	NÃO*
	B – 1 m	NÃO	NÃO*	NÃO*
	B – 10 m	NÃO*	NÃO	NÃO*
	C – 1 m	NÃO	NÃO	SIM
	C – 10 m	NÃO	NÃO*	SIM
	C – 15 m	SIM	SIM	SIM
	C – 20 m	SIM	SIM	SIM
	C – 1 m fundo	SIM	SIM	SIM
	D – 1 m	NÃO	NÃO	NÃO
	D – 10 m	NÃO	NÃO	NÃO
	E3 – 1 m	NÃO	NÃO	NÃO*
	E3 – 10 m	NÃO	NÃO	NÃO
	Clorofila-a	A5 – 1 m	NÃO	NÃO
A5 – 10 m		NÃO	NÃO	NÃO*
B – 1 m		NÃO	NÃO	NÃO
B – 10 m		NÃO	NÃO	NÃO
C – 1 m		NÃO	NÃO	NÃO
C – 10 m		NÃO	NÃO	NÃO
C – 15 m		SIM	SIM	SIM
C – 20 m		SIM	SIM	SIM
C – 1 m fundo		SIM	SIM	SIM
D – 1 m		NÃO	NÃO	NÃO*
D – 10 m		SIM	NÃO	NÃO*
E3 – 1 m		NÃO	NÃO	NÃO
E3 – 10 m		SIM	NÃO	SIM

\* Diferença entre as médias é superior a 50%, mas a variância também é grande.

### 6.3.2.5 - Conclusões

Os níveis de fósforo total das águas do lago Paranoá vêm diminuindo gradativamente ao longo dos últimos anos, acompanhado de melhoras no que se refere tanto aos indicadores de produtividade primária como das condições de balneabilidade. Nos últimos quatro anos, foram atingidos patamares que permitem classificá-lo como mesotrófico, exceto no braço do riacho Fundo.

Essa recuperação se deu em grande parte devido à remoção de fósforo pelas ETEs, a partir de 1993/1994, e à subsequente ampliação da área de cobertura dessas estações. Contudo, os efeitos do deplecionamento feito em 1998 e da modificação subsequente do esquema operativo do reservatório também foram importantes, haja vista os visíveis impactos sobre a biomassa do Lago. Além disso, deve-se considerar, para a referida melhoria, uma eventual contribuição do programa de biomanipulação desenvolvido nos braços do riacho Fundo e do Bananal, a partir de 1999.

Não obstante os aspectos controversos relacionados ao novo esquema de operação do reservatório – prejuízos aos níveis d'água para recreação nos períodos deplecionados e riscos associados a erros na definição dos momentos de deplecionamento e enchimento, entre outros –, acredita-se que esse esquema operacional tende a continuar, tendo em vista os benefícios observados.

A análise dos dados permite concluir, também, que a qualidade da água do Lago é atualmente governada pelos eventos hidrológicos associados à tipologia de uso e ocupação de sua bacia de drenagem. Nesse caso, a drenagem pluvial assume papel determinante, tanto no que se refere ao aporte de nutrientes e sedimentos como na questão bacteriológica.

## **6.4 - USOS PREPONDERANTES**

A seguir, discutem-se aspectos referentes aos usos preponderantes do lago Paranoá. Os textos sobre recreação e paisagismo, diluição de esgotos e águas pluviais e geração de energia elétrica foram inspirados, respectivamente, nos trabalhos de Menezes Júnior *et al.* (2001), Burnett *et al.* (2001) e Souto Maior *et al.* (2001). O texto sobre a pesca profissional se baseou em relatório técnico de Starling (2001).

### **6.4.1 - Recreação e paisagismo**

As funções iniciais do lago Paranoá previam e privilegiavam o lazer para a população, o embelezamento paisagístico de Brasília. O projeto original do urbanista Lúcio Costa não vislumbrava adensamento populacional para suas margens, prevendo seu livre acesso a todos e restringindo sua ocupação aos clubes esportivos, restaurantes e áreas de lazer, como elementos de integração da comunidade com o Lago.

De fato, a orla ocidental do Lago é ocupada por diversos clubes, restaurantes, hotéis e centros de convivência, comércio e cultura, conforme o plano urbanístico proposto. É o principal corpo d'água utilizado para recreação e lazer no Distrito Federal. Em suas águas, praticam-se diversos esportes – natação, iatismo, remo, vela, pesca esportiva etc – e realizam-se freqüentes competições esportivas.

Entretanto, no que diz respeito à implantação de aglomerações residenciais, o plano original de Lúcio Costa sofreu modificações durante a construção e consolidação de Brasília. Foram criados, às suas margens, os Setores de Habitação Individual Sul (Lago Sul) e Norte (Lago Norte), e o Setor de Mansões do Lago. O processo de ocupação das faixas livres ao redor das margens do Lago pelos proprietários dos lotes se tornou um problema, no sentido de que comprometem o livre acesso à orla.

### **6.4.2 - Diluição de esgotos e águas pluviais**

Outra função desempenhada pelo Lago é a recepção, diluição e depuração de esgotos tratados e não tratados, bem como das águas de drenagem pluvial da sua bacia hidrográfica. Convém mencionar que o rio Paranoá, localizado a jusante da barragem,

apresenta características de qualidade da água melhores que de alguns tributários do lago e mesmo que de trechos do rio São Bartolomeu. A razão disso é que o lago Paranoá funciona como uma imensa lagoa de estabilização das cargas orgânicas recebidas, particularmente devido ao seu grande período de detenção.

Em 1960, entrou em operação a estação de tratamento de esgotos da Asa Sul (ETEB Sul), com tecnologia de tratamento secundário (lodos ativados com baixa eficiência de remoção de nutrientes). Já nessa época, especialistas alertavam que o lançamento de efluentes tratados, mas ainda com nutrientes, favoreceria a proliferação de algas no Lago. A ETEB Norte, na Asa Norte, entrou em operação em 1969, com a mesma tecnologia de tratamento.

Conforme previsto, em pouco tempo, o lago Paranoá apresentava graves problemas relacionados a eutrofização, assoreamento e contaminação das suas águas. Em 1978, o Lago apresentou intensa floração de algas *Microcystis aeruginosa*, o que causou terrível mau cheiro, acompanhado de mortandade de peixes.

Vários estudos foram desenvolvidos ao longo das décadas de 70 e 80, com vistas a identificar uma solução técnica que promovesse a recuperação e subsequente sustentabilidade ambiental do Lago. Duas concepções básicas foram estudadas: o lançamento dos efluentes no Lago, após tratamento terciário, e a exportação dos efluentes para outras bacias, com tratamento de acordo com as características dos corpos receptores.

A decisão recaiu sobre a centralização do tratamento dos esgotos às margens do Lago. As ETEBs Sul (capacidade de projeto de 1.500 l/s) e Norte (capacidade de projeto de 920 l/s) foram ampliadas e adaptadas para realizar tratamento terciário com remoção biológica de nutrientes (processo Phoredox), seguido de polimento químico final, e inauguradas, respectivamente, em 1993 e 1994. A consequente redução do aporte de nutrientes reverteu o quadro de eutrofização intensa e, desde então, o Lago tem apresentado sinais de recuperação ambiental.

A bacia do lago Paranoá possui, atualmente, outras duas estações de tratamento de esgotos: a ETE Torto (capacidade de 6 l/s), que atende a Vila Varjão, com tratamento por infiltração em leito de areia e cloração e lançamento dos efluentes no solo, e a ETE Riacho Fundo (capacidade de 94 l/s), que atende a RA de mesmo nome, cujo tratamento é feito por

lodos ativados, em batelada e com remoção de nutrientes, lançando os efluentes no riacho Fundo. Porém, há, ainda, diversas áreas da bacia hidrográfica desprovidas de sistema público de coleta e tratamento de esgotos (adotam a solução individual do tipo fossa-sumidouro), entre as quais se citam partes do Lago Norte, Lago Sul, Núcleo Bandeirante e Riacho Fundo, além de parte dos clubes situados na orla do Lago.

As redes de drenagem pluvial são responsáveis pelo transporte de cargas poluentes geradas pelas atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica. Na bacia do lago Paranoá, predomina a ocupação urbana, sendo que as águas pluviais representam contribuição significativa de cargas, como sedimentos, matéria orgânica, organismos patogênicos, metais pesados e nutrientes, dentre outros. A situação é agravada pela existência de ligações clandestinas de esgotos, de efluentes de fossas sépticas e de substâncias tóxicas como óleos e solventes orgânicos.

#### **6.4.3 - Geração de energia elétrica**

A usina hidroelétrica (UHE) do Paranoá entrou em operação em 1962. Suas características de desempenho são as seguintes: potência instalada de 30.000 kVA; geração média anual de 11.000.000 kWh; geração média mensal (meses chuvosos) de 16.500.000 kWh; geração média mensal (meses secos) de 6.500.000 kWh; energia firme de 13.000 kW médios e demanda firme de 26.000 kW.

Do ponto de vista elétrico e energético, a UHE do Paranoá tem grande importância para a população do Distrito Federal, devido à: a) qualidade da energia gerada, principalmente no tocante à manutenção de um nível de tensão adequado para a região central de Brasília, Lago Sul, Paranoá e São Sebastião; b) importância estratégica, pois, em caso de interrupção prolongada no sistema de suprimento externo, a usina tem condições de suprir cargas prioritárias, como hospitais, repartições do poder público, parte do abastecimento d'água, etc; c) importância tarifária, pois a energia produzida na usina, apesar de suprir aproximadamente 2,6% das atuais necessidades do Distrito Federal, é um dos fatores que permitem a prática de uma das mais baixas tarifas do país, devido à sua utilização como energia de ponta.

No tocante ao regime hidrológico da região, é muito grande a variação da vazão dos cursos d'água, entre a estação chuvosa e o período de estiagem. No caso do lago Paranoá, cuja bacia de captação sofreu intenso processo de antropização e urbanização, o fenômeno é bastante acentuado. Essa variação sazonal dificulta a operação do Lago pois, se a cota no período de baixa afluência se mantiver constante, favorece-se a proliferação de algas, devido à baixa renovação e também ao reduzido deslocamento de suas águas, levando à degradação da qualidade da água.

Caso o lago Paranoá não fosse um lago urbano, a sua cota poderia ser reduzida em até 12 metros de altura, pois a tomada de água e a usina não são utilizadas na sua plena capacidade. Entretanto, devido à sua utilização prioritária para recreação e paisagismo, o lago Paranoá tem uma estreita variação de nível ao longo do ano, entre 999,50 m e 1000,80 m, em relação ao nível médio do mar.

Em 1990, a Companhia Energética de Brasília (CEB) deplecionou o nível do Lago para criar um volume de espera no reservatório e, assim, permitir a recuperação da bacia de dissipação a jusante da UHE. Observou-se, por meio de monitoramento limnológico durante os períodos de deplecionamento e enchimento, que a qualidade da água do Lago melhorou significativamente durante o deplecionamento, com redução das concentrações de fósforo e de biomassa algal. Por outro lado, no período subsequente de enchimento, a elevada poluição afluyente – nessa época, as ETEs operavam com sobrecarga e sem remoção de nutrientes – levou à recuperação dos padrões degradados de qualidade da água.

Tendo em vista essa experiência, e considerando-se as medidas de remoção do aporte de nutrientes ao Lago, o esquema de operação anual do reservatório foi alterado, a partir do deplecionamento de 1998.

Desse modo, duas premissas básicas norteiam a operação atual do Lago:

- no início e durante o período de chuva, o Lago tem de operar com cotas mais baixas, estabelecendo-se, dessa forma, um volume de espera para atenuar uma eventual onda de cheia, minimizando a probabilidade de inundação de suas margens e transbordamentos dos rios Paranoá, São Bartolomeu e Corumbá; essa medida é adotada para evitar danos às populações ribeirinhas e aos equipamentos comunitários, como pontes e estradas;

- no início do período seco, o Lago tem de estar o mais cheio possível, pois, durante a seca, deve ser mantida uma vazão defluente mínima, de forma a minorar a deterioração da água.

#### **6.4.4 – Pesca profissional**

A alteração do regime hidráulico, devido ao represamento do rio Paranoá para formação do lago Paranoá, associada aos impactos da urbanização da bacia de drenagem desse Lago (eutrofização, assoreamento e contaminação), acarretou grandes transformações dos *habitats* aquáticos, das condições físico-químicas das águas e das relações entre as espécies de peixes e entre elas e os ambientes aquático e terrestre. Essas transformações, sentidas tanto no Lago como em seus tributários e no rio Paranoá a jusante da barragem, levaram a diferentes fases de ajuste das comunidades de peixes às condições ambientais.

O processo de reestruturação passou por um momento inicial de perda de biodiversidade das comunidades de peixes que originalmente habitavam o rio Paranoá. Quanto a esse aspecto, cita-se um levantamento dos peixes do lago Paranoá, feito em 1964 pelo Dnocs, no qual o Lago foi considerado pouco piscoso, sem potencial de captura para fins comerciais e com pesca esportiva sem expressão.

Posteriormente, foram introduzidas espécies exóticas que se adaptaram bem às condições de eutrofização do Lago, o que possibilitou um aumento considerável em seu rendimento pesqueiro e, conseqüentemente, favoreceu o desenvolvimento de uma pesca comercial e esportiva bastante expressiva. Estudo feito em 1998 (Lebourges-Dhaussy *et al.*, 1998) classificou o Lago como ecossistema de grande produtividade de peixes, quando comparado a lagos tróficos temperados e a lagos e reservatórios subtropicais. Esse estudo evidenciou que os braços mais piscosos do Lago são os do riacho Fundo e do Gama, e que as maiores concentrações de peixes se verificam próximo aos lançamentos das ETEBs Sul e Norte. A área menos eutrofizada do braço do Torto concentra a menor biomassa de peixes.

Cabe registrar, ainda, quanto ao povoamento do lago Paranoá com espécies exóticas, a ocorrência de invasão de algumas dessas espécies nos tributários do Lago, com

desenvolvimento de populações expressivas, notadamente nas confluências, devido ao efeito do represamento, e nas áreas mais assoreadas dos canais fluviais.

Convém citar estudo que avaliou a qualidade do peixe proveniente do lago Paranoá sob o aspecto de contaminação por patogênicos, pesticidas e metais pesados (ISDF *et al.*, 1996). Verificou-se que, no que se refere aos resíduos dos pesticidas analisados, o Lago oferece condições aceitáveis para seu uso tanto para pesca como para recreação. Quanto às condições higiênico-sanitárias, somente 6% dos peixes analisados apresentaram-se insatisfatórios, mas não foram considerados impróprios para o consumo, recomendando-se o cozimento prévio à ingestão. Já com relação à presença de metais, não foi possível indicar um forte nível de contaminação nas amostras analisadas.

Com relação ao aproveitamento dos recursos pesqueiros do Lago, a pesca profissional esteve legalmente proibida de 1966 a 1999, mas, apesar da fiscalização, era feita clandestinamente e se constituía na principal fonte de renda para grupos de pescadores. Durante vinte meses consecutivos, a partir de abril de 2000, foi feito monitoramento da pesca do Lago para fins comerciais, como parte do Programa de Biomanipulação desenvolvido pela Caesb.

Durante esse monitoramento, verificou-se que a maioria dos peixes capturados pertenciam a espécies exóticas causadoras de problemas à qualidade da água do Lago, notadamente as tilápias. Essas espécies exploram preferencialmente o sedimento orgânico do fundo e possuem grande capacidade de proliferação nas áreas mais eutrofizadas, contribuindo para o aporte interno de fósforo e para a ocorrência de mortandades maciças em momentos de déficit de oxigênio causados pela circulação da massa d'água.

Por isso, concluiu-se que a pesca seletiva em escala comercial traz benefícios ambientais, tanto pela prevenção de mortandades maciças de peixes nas áreas susceptíveis (próximas às ETEBs Sul e Norte) como pela redução do aporte interno de fósforo nas áreas liberadas para pesca profissional. Também resulta em importantes benefícios socioeconômicos, evidenciados pela melhoria de renda dos pescadores e pela geração de empregos. Como consequência, em novembro de 2002, a pesca profissional seletiva foi liberada nos braços do riacho Fundo e do Bananal.



## 6.5 - ANÁLISE DO CONTEXTO ATUAL DE CONFLITOS ENTRE USOS

A análise do contexto atual de utilização do lago Paranoá permite concluir que, apesar de ser um reservatório de usos múltiplos, não se verificam situações de grandes conflitos pelos usos da água, tendo sido alcançada uma condição de relativo equilíbrio entre eles. Isso se deve, essencialmente, ao caráter não-consuntivo dos seus usos preponderantes.

Os conflitos de uso verificados atualmente estão, basicamente, relacionados a incompatibilidades entre a prática de esportes, a recreação e a pescaria. Por exemplo, há conflitos entre os pescadores amadores e profissionais, pois, para os profissionais, as áreas de pesca permitida são limitadas aos braços do riacho Fundo e do Bananal, enquanto que, para os amadores, não há essa limitação. Outro exemplo é o conflito entre usuários de lanchas, pescadores e banhistas: o tráfego de embarcações afeta o uso da área por banhistas, por questões de segurança física e também devido a problemas de qualidade da água. Além disso, os motores dos barcos assustam os peixes, prejudicando a pescaria. Percebe-se que esse tipo de conflito pode ser gerenciado por meio da adoção de medidas de zoneamento do Lago, delimitando áreas apropriadas e regras de conduta para cada uso, por exemplo.

A recreação e a composição da paisagem urbana são os usos prioritários. Os demais usos, ou não são conflitantes, ou têm suas intensidades restringidas por eles. A geração de energia hidrelétrica na UHE-Paranoá se presta a fins estratégicos de minimização de custos da operadora e de suprimento emergencial de consumidores especiais. Suas regras operativas, condicionadas pela exigência de níveis d'água elevados e pouco variáveis, foram definidas para garantir a segurança no amortecimento de cheias, no período chuvoso, e a circulação mínima necessária à manutenção da qualidade da água em níveis adequados à recreação, durante a estiagem.

Ainda com relação a sua utilização prioritária para recreação e paisagismo, convém ressaltar que a modificação do esquema operativo do reservatório, a partir de 1998, tem ocasionado alguns prejuízos no período de deplecionamento, como dificuldade de acesso de embarcações aos ancoradouros dos clubes, exposição de áreas marginais e comprometimento da navegabilidade em algumas regiões. Em contrapartida, esse esquema

de operação proporciona melhores condições de usufruto do potencial recreativo no restante do ano hidrológico, devido à sua contribuição para a melhoria da qualidade da água do Lago. Além disso, os períodos de níveis deplecionados têm sido aproveitados para a realização de campanhas de fiscalização de ligações clandestinas de esgoto e de captação de água, bem como para a limpeza das margens.

Quanto à diluição e à depuração dos esgotos sanitários e pluviais gerados na bacia, os usos e a ocupação da bacia de drenagem são limitados por rigoroso zoneamento urbano e os esgotos sanitários são, na sua maioria, tratados em nível terciário. Essas medidas de controle da poluição resultam em boas condições de qualidade ambiental, necessárias à prática de atividades recreativas e à conservação do ecossistema aquático. Portanto, no contexto decisório de gerenciamento dos usos da água do Lago, a diluição e a depuração de águas servidas podem ser consideradas como restrições do problema, uma vez que as decisões relativas ao saneamento da bacia ou já foram tomadas anteriormente – tipo de tratamento dos esgotos gerados e local de lançamento dos efluentes tratados –, ou são de implementação complexa e onerosa – por exemplo, o tratamento das águas da drenagem pluvial urbana.

Pode-se concluir, portanto, que não há grandes conflitos entre os usos da água do Lago, havendo, sim, a imposição de determinadas restrições, referentes principalmente aos impactos sobre a qualidade da água do Lago, para que não haja prejuízos aos usos não-consuntivos prioritários. Por outro lado, o lago Paranoá ainda é, de certa forma, “sub-aproveitado”, havendo potencialidades a serem exploradas, as quais serão discutidas no item seguinte.

## **6.6 - USOS POTENCIAIS DO LAGO PARANOÁ**

Atualmente, o maior potencial de aproveitamento do Lago consiste, sem dúvida, da intensificação da sua utilização para fins de recreação e amenidades ambientais (Netto, 2001). Como ressaltam Branco e Rocha (1977), lagos constituem um recurso potencial para proporcionar entretenimento e contato com a natureza às populações, especialmente em regiões desprovidas de suficientes recursos naturais alternativos.

Tendo isso em vista e, considerando-se, de um lado, as deficiências, tanto em quantidade como de infra-estrutura, dos acessos públicos à orla, e, do outro, a recuperação da qualidade ambiental do Lago, sua beleza e localização privilegiada no contexto urbano, conclui-se que ainda há potencial recreacional não aproveitado. Quanto a esse aspecto, faz-se referência ao “Projeto Orla”, concebido pelo governo distrital com vistas a incentivar a utilização do Lago para fins recreativos e esportivos. Convém ressaltar que a recreação proporciona benefícios socioeconômicos diretos e indiretos vultosos, cuja estimativa requer, no entanto, procedimentos específicos e complexos.

Em princípio, a decisão pela intensificação do aproveitamento recreativo do Lago não leva a conflitos com os demais usos, atuais ou potenciais. No entanto, o conceito de atividade recreativa é bastante abrangente, englobando, além dos esportes de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho), dos esportes náuticos (remo, lancha, vela, etc) e da pesca esportiva, as atividades em terra (piqueniques, acampamentos, caminhadas, etc) e a contemplação da paisagem. Obviamente, há atividades que representam maior risco à qualidade da água que outras, como, por exemplo, embarcações que lançam lixo e resíduos sanitários na água, além dos resíduos da operação dos motores (gasolina, aditivos, óleos e graxas). No entanto, é muito difícil estabelecer limites definidos a essas atividades, o que praticamente inviabiliza a proibição de uma ou outra atividade indesejada. Caberiam a um Comitê a ser constituído, nesse caso, a discussão e a proposição de procedimentos e restrições de uso, bem como de exigências técnicas para a implantação da infra-estrutura necessária às atividades recreativas.

Outro uso potencial do Lago consiste da navegação como meio de transporte aquaviário. Atualmente, o Lago é navegado, majoritariamente, por pequenas embarcações, para fins de esporte e lazer. Entretanto, apresenta boas condições de navegabilidade para embarcações de maior calado em toda sua extensão, exceto nas confluências assoreadas dos tributários. Tendo isso em vista, e considerando a já referida inserção estratégica na área urbana, o Lago poderia ser utilizado como alternativa de transporte intermodal, complementado por ônibus/táxis a partir de terminais de integração (Menezes Júnior *et al.*, 2001).

Não se deve menosprezar, entretanto, o fato de que a navegação em grande escala pode ocasionar importantes impactos à qualidade da água. Os motores das embarcações lançam

na água grande quantidade de combustível não-queimado, lubrificantes e outros produtos da combustão. Dentre os compostos químicos associados a esses lançamentos, citam-se óleos voláteis e não-voláteis, fenóis, chumbo e zinco, que podem causar danos à ecologia do corpo hídrico, comprometer sua utilização para abastecimento público devido a problemas de toxicidade, sabor e odor da água, e causar alterações na carne de peixes comestíveis (Branco e Rocha, 1977). Devido a esses problemas, a análise da viabilidade de se implantar o transporte aquaviário no Lago exige estudos não só sobre rotas e infraestrutura necessária, como também sobre procedimentos para minimizar os lançamentos de resíduos na água.

Com respeito a usos consuntivos, certamente esses devem ser considerados como possibilidades reais de utilização das águas do Lago. Tendo em vista a carência hídrica da região, que possui grande contingente populacional, mas está situada em região de nascentes e, portanto, de rios com pouca vazão, é provável que, mais cedo ou mais tarde, a alternativa de se utilizar o Lago como fonte de suprimento de água seja trazida à discussão.

Análises de permanência das vazões no Lago, apresentados no item 6.2.3, indicam, com 99% de probabilidade de excedência, que vazões de até 4 m<sup>3</sup>/s poderiam deixar de ser turbinadas na usina hidrelétrica, ao longo de todo ano (7,5 m<sup>3</sup>/s, se a retirada for somente nos meses chuvosos), para servir a finalidades consuntivas. Ressalta-se que esses valores servem mais como estimativa inicial da magnitude das vazões captáveis, carecendo de avaliações mais detalhadas quanto às vazões mínimas a serem garantidas a jusante. Como a utilização para recreação e paisagismo é condicionante da operação do reservatório, penaliza-se, em algum grau, a geração de energia, para que não haja prejuízo dos níveis d'água adequados àquelas atividades.

A derivação de águas do Lago já é feita, sem controle e fiscalização, para irrigação paisagística de diversas propriedades às margens do Lago e também de jardins e áreas verdes da cidade. Essa utilização pode ser considerada modalidade de reúso não-potável, instrumento de racionalização do uso do recurso "água", pois evita que água tratada potável seja usada para fins menos nobres. Outras possibilidades de utilização da água do Lago são para reserva de proteção contra incêndios, lavagem de ruas, entre outras. Deve-se ressaltar que o alcance desse tipo de uso é limitado pela viabilidade econômica de se implantarem redes de distribuição de água não-potável na cidade e pelas dificuldades

operacionais e riscos potenciais de ocorrência de conexões cruzadas (Hespanhol, 2001). Entretanto, como essa modalidade de reúso não-potável já ocorre em algumas áreas, convém regulamentar e criar mecanismos para fiscalizar essa atividade.

No que se refere à irrigação agrícola, não há demanda significativa na sub-bacia que drena diretamente ao lago Paranoá, que não tem vocação agrícola, mas se capta água em tributários do Lago para esse fim (sub-bacias do riacho Fundo e do ribeirão do Gama, basicamente). Deve-se ressaltar, contudo, a tendência de recuo ou ao menos estabilização das atividades agrícolas nessas áreas. A maioria dos núcleos rurais e colônias agrícolas existentes, implantados no passado para suprir a demanda da região por hortifrutigranjeiros, vêm sendo parcelados e transformados em loteamentos com feições urbanas, principalmente a partir da década de 90. Além disso, os efeitos prejudiciais associados a essa alteração de uso e ocupação do solo, sem a infra-estrutura adequada, comprometem a produção agrícola nas poucas áreas rurais remanescentes (Concremat, 2003).

Vale registrar que também se capta água em tributários do Lago para fins de abastecimento público (ribeirão do Torto e córregos Cabeça de Veado, Taquari e Cachoeirinha). Além disso, existem estudos para implantação de outras captações (ribeirão Bananal e córrego Taquara).

Em todo caso, convém ressaltar que, nos casos de novas captações de água nos tributários do Lago para quaisquer fins consuntivos, deve ser considerado o impacto dessas retiradas de vazão no balanço hídrico e, conseqüentemente, no tempo de residência do reservatório. Além disso, devem-se avaliar os prejuízos à capacidade de diluição e depuração do Lago, na medida em que água de boa qualidade é retirada, retornando água poluída e em menor quantidade.

Já a utilização do lago Paranoá como fonte de abastecimento público não tem sido considerada nos planos diretores de recursos hídricos do Distrito Federal. Acredita-se que isso se deve, em parte, aos problemas enfrentados pela Caesb durante o período em que a cidade do Paranoá era abastecida com água do Lago, no fim da década de 80, em que, apesar de a água tratada ser potável, houve forte rejeição da população local em consumir água em que haviam sido lançados esgotos, ainda que tratados. Entretanto, essa imagem

não corresponde à realidade, tanto que o lago Paranoá foi considerado como possível fonte de abastecimento por EIAs de novos setores habitacionais na bacia, como o do Taquari (Hidrogeo, 1990), do Dom Bosco (TC/BR, 1997) e do Jardim Botânico (NCA, 1997).

O lago Paranoá proporciona elevado período de detenção hidráulica, favorável à estabilização da matéria orgânica e ao decaimento dos organismos patogênicos lançados em suas águas. Devido a essa característica, ainda em 1990, a qualidade da água era considerada melhor que a de outros mananciais que abastecem grandes cidades brasileiras, como o Rio de Janeiro (rio Paraíba do Sul), São Paulo (represa Billings) e Belo Horizonte (rio das Velhas). Àquela época, a potabilização mediante tratamento convencional seria comprometida somente por problemas associados à elevada concentração de algas (Hidrogeo, 1990).

Passados alguns anos, a implementação das medidas de controle da poluição gerada na bacia de drenagem do Lago conduziu à melhoria da qualidade de suas águas. Com isso, o lago Paranoá pode ser considerado como um manancial “capaz de reforçar por muito tempo o fornecimento de água para a região da bacia do Paranoá”, necessitando, para isso, de um “amplo processo de esclarecimento da população sobre como esse corpo hídrico tem recuperado a qualidade e de como pode ser maximizado seu uso em prol da comunidade do Distrito Federal” (NCA, 1997).

À segurança sanitária proporcionada pelo grande tempo de residência da água no Lago, soma-se a peculiaridade de a sua bacia hidrográfica contar com 66% de área protegida por unidades de conservação (Concremat, 2003) e estar totalmente inserida nos limites do Distrito Federal. Além disso, existem restrições à ocupação urbana e ao desenvolvimento de atividades efetiva ou potencialmente poluentes. Essa condição, além de diminuir os possíveis impactos negativos sobre a água do Lago, permite o gerenciamento das atividades potencialmente poluidoras em um contexto político-institucional menos complexo, uma vez que não envolve interesses diretos de âmbito interestadual.

Outra importante vantagem comparativa da utilização do Lago como fonte de abastecimento é sua proximidade aos centros consumidores. Isso leva a menores custos de implantação do sistema hidráulico necessário e facilita sua incorporação ao sistema integrado de abastecimento da região, possibilitando a otimização da operação dos outros

reservatórios utilizados para o abastecimento do Distrito Federal (lagos Santa Maria e Descoberto).

Certamente, devem ser desenvolvidos estudos mais aprofundados sobre a qualidade da água do Lago, uma vez que a utilização dessa água para fins de abastecimento público constitui modalidade de reúso potável indireto, ao qual estão associados riscos devido à presença de organismos patogênicos e outros poluentes presentes nos efluentes lançados no Lago. Nesse sentido, vale ressaltar que a captação de água no Lago para abastecimento atende a recomendação de Hespanhol (2001) quanto à utilização somente de sistemas de reúso indireto. Além disso, o referido autor recomenda reutilizar águas que receberam somente efluentes domésticos, empregar barreiras sanitárias múltiplas nos sistemas de tratamento e adquirir aceitação pública. Uma medida alternativa no sentido de viabilizar a utilização do Lago para abastecimento público seria a exportação dos efluentes de esgotos tratados para outra bacia, devendo-se, para isso, avaliar o impacto sobre o balanço hídrico do reservatório.

Outra possibilidade de utilização da água do Lago a ser examinada consiste do aumento da diluição e da depuração de efluentes, tanto os tratados nas ETEs e os da drenagem urbana, como os lançados clandestinamente. Esse aumento de carga de poluentes pode ser devido ao adensamento populacional, à implantação de novos núcleos urbanos e à instalação de indústrias na bacia de contribuição.

O processo de degradação do lago Paranoá deve-se, em essência, aos efeitos da urbanização da sua bacia de drenagem, notadamente do lançamento de esgotos e águas pluviais. Sua limitada capacidade de suporte a novas cargas poluentes impõe a necessidade de controle sobre os usos e a ocupação do solo. Desse modo, o Plano Diretor de Ordenamento Territorial – PDOT, de 1997, restringe novas ocupações na bacia do lago Paranoá, incentivando o crescimento urbano para as chamadas “Zonas Urbanas de Dinamização”, localizadas na porção sudoeste do Distrito Federal, fora da bacia do Lago.

Segundo esse instrumento de gestão, a ocupação de novas áreas da bacia do lago Paranoá somente é permitida após a comprovação de que as características dos empreendimentos propostos não comprometem a sustentabilidade ambiental do Lago, ou seja, não suplantam os limites das cargas poluentes assimiláveis por esse corpo hídrico.

À fragilidade ambiental da bacia do lago Paranoá se contrapõe sua atratividade a novas ocupações. Possui boa infra-estrutura urbana, comparável à de alguns países desenvolvidos, o que se reflete em bons indicadores de qualidade de vida e acaba por gerar demandas por novas áreas habitacionais e de serviços. Em certos aspectos, sua ocupação também é interessante para o Poder Público, visto que os custos envolvidos são menores que aqueles para implantar novos aglomerados urbanos, pois, no último caso, há a necessidade de se compor toda infra-estrutura urbana (malha viária, segurança pública e os equipamentos urbanos básicos). Além disso, ressalta-se a característica de que muitos setores habitacionais e industriais encontram-se em fase de consolidação.

Considerados esses aspectos, menciona-se o fato de que, apesar das restrições ambientais, havia, em janeiro de 2001, 44 projetos em estudo de viabilidade, em elaboração ou concluídos para novos parcelamentos do solo na área da bacia do lago Paranoá, destinados a usos comercial, industrial, institucional e habitacional. A população prevista para os projetos habitacionais totalizava, naquela época, cerca de 200.000 habitantes (Oliva *et al.*, 2001).

Convém ressaltar que o adensamento populacional e a implantação de novos núcleos urbanos e indústrias podem ocorrer em contexto institucional mais ou menos robusto. A se manter a configuração atual, as considerações de ordem ambiental tendem a ser suplantadas pelas forças socioeconômicas atuantes no processo de expansão urbana. Cenário alternativo mais otimista, porém menos provável, concretiza-se caso haja o fortalecimento das instituições responsáveis pela gestão urbana e ambiental e, portanto, o efetivo controle dos usos e da ocupação territorial da bacia.

De todo modo, a intensificação da atividade antrópica da bacia traz, em maior ou menor grau, impactos negativos ao lago Paranoá, seja pelo incremento das vazões ou pela introdução de novos poluentes nos esgotos, seja pela piora da qualidade das águas da drenagem urbana. Pode haver, portanto, comprometimento da qualidade de suas águas e prejuízo a outros usos.

Anteriormente, ponderou-se que a utilização do Lago para diluição e depuração de águas servidas pode ser tratada como restrição do problema. Parte-se do pressuposto de que a



política pública implementada para a gestão da poluição é adequada. Nesse caso, a geração de cargas poluentes adicionais pode ser considerada na forma de cenários possíveis.

## **7 - O SUPORTE METODOLÓGICO PROPOSTO PARA APOIO À GESTÃO ESTRATÉGICA DE RESERVATÓRIOS DE USOS MÚLTIPLOS**

### **7.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A diretriz adotada para a concepção do suporte metodológico ora proposto para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos é a de que as demandas quanto à formalização do problema e à identificação das possíveis decisões preponderaram sobre a necessidade de comparação e hierarquização efetivas dessas possíveis decisões. Não se pode negar que, nessa consideração, está implícita a percepção do contexto atual de gestão estratégica do lago Paranoá. No caso desse Lago, o caráter potencial de muitos dos seus possíveis usos, por um lado, faz com que sejam pertinentes avaliações preliminares sobre os impactos desses usos sobre o corpo lacustre. Pelo outro lado, essa característica resulta na ausência de dados confiáveis sobre a viabilidade desses usos, o que compromete a efetividade da comparação entre decisões sobre que usos convém implementar ou não.

Buscou-se, então, conceber uma ferramenta que possa contribuir para que membros de Comitês de Bacia Hidrográfica ou indivíduos responsáveis pela formulação, análise e tomada de decisão quanto a alternativas de planejamento urbano, possam simular os impactos no reservatório em estudo, advindos de decisões quanto à implementação de novos usos da água ou à alteração no padrão dos usos atuais, bem como quanto à alterações no aporte de fósforo ao reservatório. Indiretamente, a simulação desses impactos permite antever o potencial de conflito entre os usos pretendidos, em função do cenário simulado.

Feitas essas considerações iniciais, apresentam-se, nos itens seguintes, a estrutura geral do suporte metodológico proposto e as simplificações adotadas para sua implementação em nível de protótipo, definidas em função das especificidades do lago Paranoá. Também são apresentadas algumas aplicações do suporte metodológico ao caso desse Lago. Por fim, apresenta-se a avaliação dos resultados da presente pesquisa, feita por meio de análise de consistência das respostas das simulações realizadas e de consulta a especialistas, usuários e gestores.

## 7.2 - ESTRUTURA GERAL DO SUPORTE METODOLÓGICO

Apresentam-se, a seguir, as bases conceituais gerais do suporte metodológico proposto para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos. Em termos sucintos, esse suporte metodológico consiste de um modelo de simulação do reservatório, em termos de quantidade de água (nível d'água, vazão defluente e tempo de residência hidráulica) e de qualidade da água (nível trófico), associado a um modelo multicritério simples, inspirado no trabalho de Tilmant *et al.* (2002a). Esse modelo multicritério permite a consideração de múltiplos usos com diferentes prioridades e se baseia na agregação ponderada das satisfações proporcionadas pela operação do reservatório aos diversos usos, segundo as condições simuladas.

O objetivo final da aplicação desse suporte metodológico é indicar em que grau o reservatório em estudo é capaz de atender as demandas dos usos da água. Esse grau de satisfação indica, indiretamente, o potencial de conflitos entre esses usos.

A estrutura geral do suporte metodológico proposto está apresentada na Figura 7.1 e é detalhada nos parágrafos seguintes. Sua exemplificação é feita no item 7.4, em que são apresentadas aplicações simuladas ao caso do lago Paranoá.

Primeiramente, deve ser definido o cenário a ser simulado. Para isso, é necessária a especificação da configuração pretendida de usos da água do reservatório. Esses usos são expressos em termos de objetivos a serem atendidos com a operação do reservatório. A operação do reservatório pode visar, por exemplo, ao “abastecimento público confiável”, ao “suprimento suficiente de água para agricultura”, à “geração eficiente de energia hidrelétrica” e a “condições favoráveis à recreação”.

Os objetivos são representados por funções de satisfação, as quais representam o quanto os diferentes estados possíveis do sistema (volume armazenado ou vazão retirada, por exemplo) atendem às definições de preferências dos usuários. Em outras palavras, essas funções expressam os diferentes graus de satisfação experimentados pelos usuários, tendo em vista os estados possíveis do sistema.

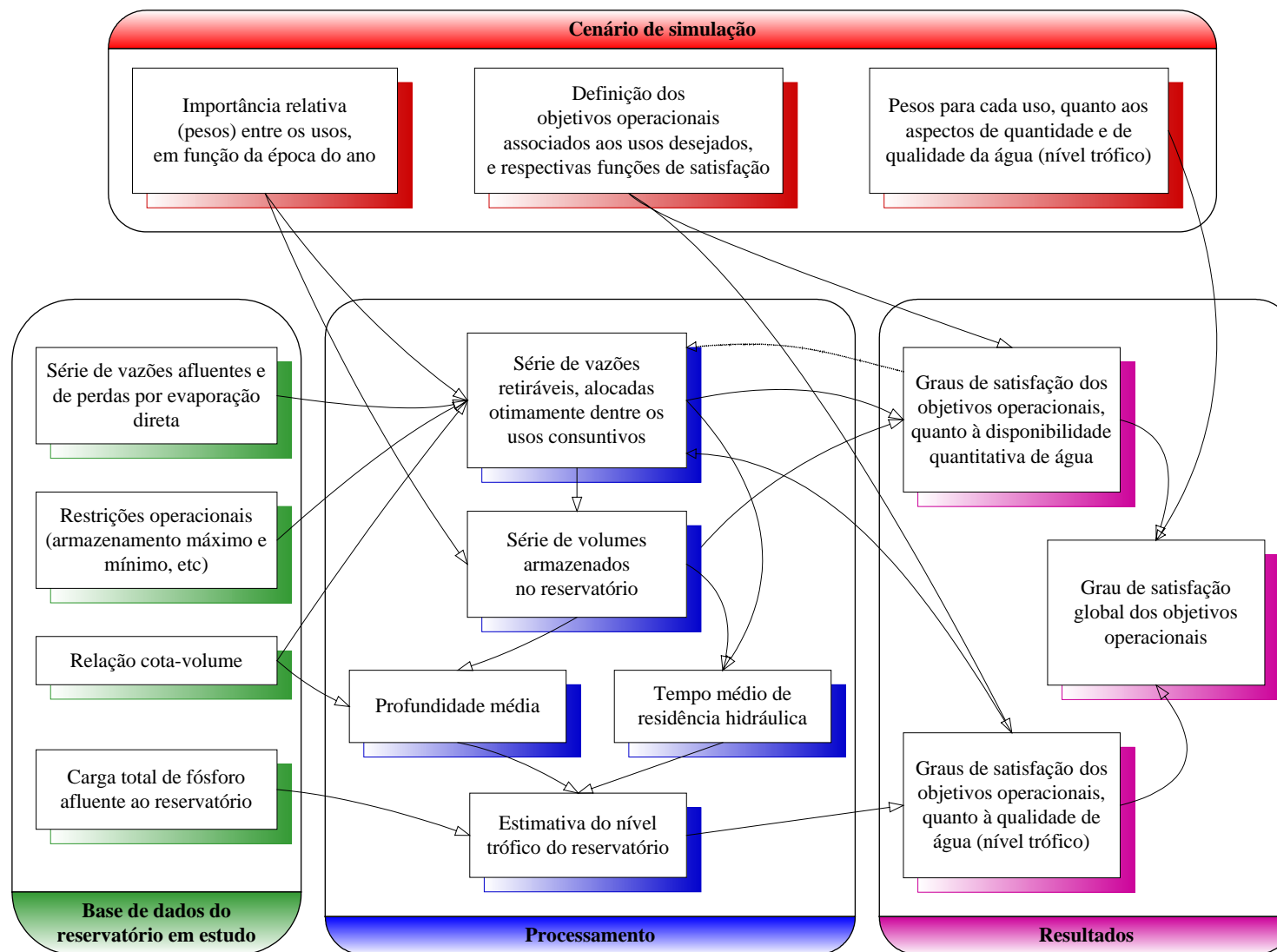


Figura 7.1 – Estrutura do suporte metodológico proposto para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos (casos genéricos).

Para a construção das funções de satisfação, deve-se definir a função matemática que melhor representa a percepção de satisfação dos usuários e especialistas e especificar, com o apoio desses atores, os pontos notáveis dessa função. Por exemplo, se um objetivo é garantir um “suprimento suficiente de água para irrigação”, pode-se indicar a vazão captada correspondente à satisfação total desse objetivo e, do mesmo modo, a condição correspondente à não-satisfação desse objetivo (vazão captada nula ou menor que o mínimo valor considerado economicamente viável, por exemplo).

A consideração da multiplicidade de usos é feita por meio da ponderação aditiva. Nesse sentido, devem ser atribuídos pesos indicativos da importância relativa entre os usos pretendidos ( $w_i$ ). Como as demandas de cada uso podem ser influenciadas pela época do ano, podem-se ter jogos de pesos diferentes para os períodos secos e para os chuvosos. Por exemplo, nos meses secos, podem-se priorizar as captações para abastecimento e irrigação e a produção de energia. Já na época chuvosa, o amortecimento de cheias pode ser relativamente mais importante.

Além disso, os vários usos podem ter expectativas diferenciadas quanto aos aspectos de quantidade e de qualidade da água. Por exemplo, para a geração de hidreletricidade, num contexto de usos múltiplos, a preocupação quanto ao nível trófico praticamente inexistente e toda importância pode ser dada para as variáveis de quantidade (nível d'água, afluência prevista). Já usos como abastecimento público e recreação são afetados tanto por aspectos referentes à quantidade (vazão retirada e nível d'água, respectivamente) como pelo nível trófico. Para permitir a consideração dessas diferenças, devem ser atribuídos, para cada uso, pesos indicativos das importâncias relativas entre os aspectos de quantidade ( $w_{i, quanti}$ ) e de qualidade da água, quanto ao nível trófico ( $w_{i, quali}$ ).

A simulação da operação do reservatório em estudo é feita a partir de um modelo de balanço hídrico desse corpo d'água. Esse modelo de balanço hídrico deve possibilitar, a partir da utilização de séries hidrológicas representativas e da consideração das restrições operacionais quanto a níveis d'água máximo e mínimo, a simulação dos efeitos sobre o reservatório (nível d'água, vazões defluentes no exutório e tempo de residência hidráulico), advindos de retiradas de vazão diretamente do corpo lacustre ou indiretamente a partir dos tributários do reservatório. Obviamente, quanto mais precisas forem a modelagem do

balanço hídrico de entradas e saídas do reservatório e as séries hidrológicas utilizadas, melhor será o resultado da simulação.

Os resultados da simulação da operação do reservatório permitem, a partir de um determinado cenário de aporte de fósforo ao reservatório, estimar a tendência de eutrofização desse corpo d'água. Sugere-se, para isso, o emprego do modelo desenvolvido pelo Cepis (1990) para estimativa da probabilidade de eutrofização em lagos tropicais quentes, em função da estimativa da concentração média de fósforo na água armazenada.

Os resultados finais da simulação – vazões retiradas do reservatório e alocadas dentre os usos consuntivos, níveis d'água no reservatório e tendência de eutrofização da água armazenada – são confrontados com as metas de cada uso, representadas pelas respectivas funções de satisfação. Desse confronto, obtêm-se os graus de satisfação dos diferentes usos, quanto aos aspectos de quantidade ( $\mu_i, quanti$ ) e qualidade da água ( $\mu_i, quali$ ), que podem assumir valores conforme a Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Intervalos dos graus de satisfação de diferentes usos quanto aos aspectos de quantidade e qualidade da água.

Usos	$\mu_{quanti}$	$\mu_{quali}$
Produção de energia	[0,1]	1*
Irrigação agrícola	[0,1]	[0,1]
Abastecimento de água	[0,1]	[0,1]
Amortecimento de cheias	[0,1]	1*
Recreação	[0,1]	[0,1]
Navegação	[0,1]	1*
Paisagismo	[0,1]	[0,1]
Criação de peixes	[0,1]	[0,1]

\* Assume-se ausência de restrição quanto ao nível trófico (aspecto de qualidade da água ora considerado).

Esses graus de satisfação quantitativo e qualitativo são ponderados, para cada uso, pelos respectivos pesos  $w_i, quanti$  e  $w_i, quali$  (Equação 7.1). Obtêm-se, então, os graus de satisfação  $\mu_i$  de cada uso. Por fim, os graus de satisfação dos vários usos são agregados, por meio da ponderação com os pesos  $w_i$ , num grau de satisfação global ( $\mu_{global}$ ) proporcionado a esses

usos pela operação do reservatório nas condições simuladas (Equação 7.2). Esse último valor indica o quanto o reservatório em estudo corresponde às necessidades dos usos considerados e, representa, indiretamente, o potencial de ocorrência de conflitos entre esses usos. Esse potencial de conflitos existe, justamente, porque há diferença entre o que é (de fato) e o que deveria ser (idealmente) proporcionado pelo reservatório para esses usos.

$$\mu_i = w_{i, quanti} \cdot \mu_{i, quanti} + w_{i, quali} \cdot \mu_{i, quali} \quad , \quad \text{com } w_{i, quanti} + w_{i, quali} = 1 \quad (7.1)$$

$$\mu_{global} = \sum_i w_i \cdot \mu_i \quad , \quad \text{com } \sum_i w_i = 1 \quad (7.2)$$

em que:

$w_{i, quanti}$  = importância relativa da disponibilidade de água armazenada ou retirada do reservatório para o  $i$ -ésimo uso;

$w_{i, quali}$  = importância relativa dos aspectos associados ao nível trófico da água armazenada ou retirada do reservatório para o  $i$ -ésimo uso;

$w_i$  = importância relativa do  $i$ -ésimo uso em relação aos demais.

Para fornecer uma visão global da estrutura lógica do suporte metodológico, apresenta-se o resumo a seguir:

a) Parte-se da definição de um cenário a ser simulado:

-  $i$  usos da água do reservatório e respectivas funções de satisfação quanto à disponibilidade quantitativa e ao estado trófico da água;

- importâncias relativas (pesos) dos  $i$  usos,  $w_i$  ( $\sum w_i = 1$ ), em relação aos demais, diferenciáveis em função da época do ano;

- importância relativa, para cada uso  $i$ , das questões relativas à disponibilidade quantitativa ( $w_{i, quanti}$ ) e ao estado trófico das águas ( $w_{i, quali}$ ).

b) Devem ser informadas algumas características do reservatório em estudo:

- restrições operacionais de armazenamento máximo e mínimo;

- série hidrológica de referência das vazões totais afluentes e de perdas por evaporação direta;

- carga total de fósforo afluente ao reservatório;

- relação cota-volume do reservatório.

c) Após um processo de cálculo iterativo, que cessa quando os valores de graus de satisfação (alínea d) não são melhorados, obtêm-se os seguintes resultados:

- série otimizada de vazões retiráveis do reservatório, alocada dentre os usos consuntivos;

- série de volumes armazenados e de níveis d'água correspondentes, que afetam, direta ou indiretamente, a maioria dos usos;

- tendência de eutrofização da água armazenada.

d) Esses resultados são confrontados com as funções de satisfação de cada uso da água, fornecendo, então, os graus de satisfação dos usos simulados quanto à disponibilidade de água e ao nível trófico. Esses graus de satisfação (de cada uso  $i$ ) são ponderados pelos pesos  $w_{i,quanti}$  e  $w_{i,quali}$ . Os valores assim obtidos constituem os graus de satisfação de cada uso  $i$ , os quais, ponderados pelos pesos  $w_i$ , resultam no grau de satisfação global dos usos simulados proporcionado pela operação do reservatório.

### **7.3 - O SUPORTE METODOLÓGICO IMPLEMENTADO PARA O CASO DO LAGO PARANOÁ, NO DISTRITO FEDERAL**

O suporte metodológico proposto para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos, apresentado no item 7.2, foi desenvolvido tendo-se como base aplicação específica ao caso do lago Paranoá. Em função do caráter preliminar da ferramenta concebida e da limitação de tempo para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, optou-se por não implementar o suporte metodológico em linguagem de programação computacional. Dessa forma, para realizar as aplicações do suporte ao caso do lago Paranoá, foram utilizadas planilhas de cálculo Excel<sup>®</sup>. Devido às limitações de programação dessas planilhas, foram adotadas algumas abordagens simplificadas, possíveis em função de especificidades do caso de aplicação. O desenvolvimento futuro de aplicativo em linguagem de programação adequada apresentará a vantagem de permitir a generalização do suporte metodológico.

A aplicação do suporte metodológico exigiu o desenvolvimento de um modelo de simulação do balanço hídrico do lago Paranoá. Para a construção desse modelo, foram utilizadas as séries hidrológicas de 1979 a 2002, que se mostraram representativas da



variabilidade hidrológica da região. Como o Lago tem morfologia dendrítica, seus quatro braços apresentam comportamentos distintos entre si, e o segmento central representa, de certa forma, a agregação desses comportamentos. Portanto, o modelo de simulação faz os balanços de entradas e saídas individuais para cada um desses cinco segmentos do Lago, o que permite, juntamente com as curvas cota-volume de cada segmento, estimar os respectivos tempos de residência hidráulica. O fato de o balanço hídrico ser feito para cada um dos segmentos do Lago permite a simulação de retiradas de vazão feitas em qualquer um dos segmentos e tributários principais desse Lago.

Para a construção das funções de satisfação dos usos, adotou-se a metodologia utilizada por Tilmant *et al.* (2002a), discutida no item 4.1.1. Nessa abordagem, devem ser informados os valores máximo e mínimo associados, respectivamente, ao completo atendimento e ao não-atendimento de cada objetivo. Partindo-se do princípio de que a precisão da simulação não enseja a consideração de descontinuidades nas funções de satisfação, os valores máximo e mínimo são ligados por uma curva sigmoidal, sendo o valor 1 correspondente ao valor máximo e o valor 0 ao mínimo.

A escolha recaiu por esse tipo de abordagem devido à facilidade em se indicarem os valores limites para cada uso, o que é particularmente importante tendo-se em vista a incerteza do contexto de aplicação ao caso do lago Paranoá, em que são considerados usos potenciais futuros. No entanto, ressalta-se que há outras metodologias e tipos de função possíveis para derivar essas funções associativas ou mesmo os graus de satisfação. No item 7.3, são apresentadas aplicações desse suporte ao caso do Lago, em que foram adotadas algumas abordagens diferentes para a definição dos graus de satisfação, em função das especificidades de cada uso.

A função sigmóide, representada na Figura 7.2 e pela Equação 7.3, caracteriza-se pelo seu formato em S alongado, e é contínua, monotonicamente crescente e limitada por assíntotas horizontais. O parâmetro  $a$  representa o grau de inclinação da curva – quanto maior  $a$ , mais vertical é a função. Nas aplicações do suporte metodológico ao caso do lago Paranoá, foi adotado  $a = 1$ .

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (7.3)$$

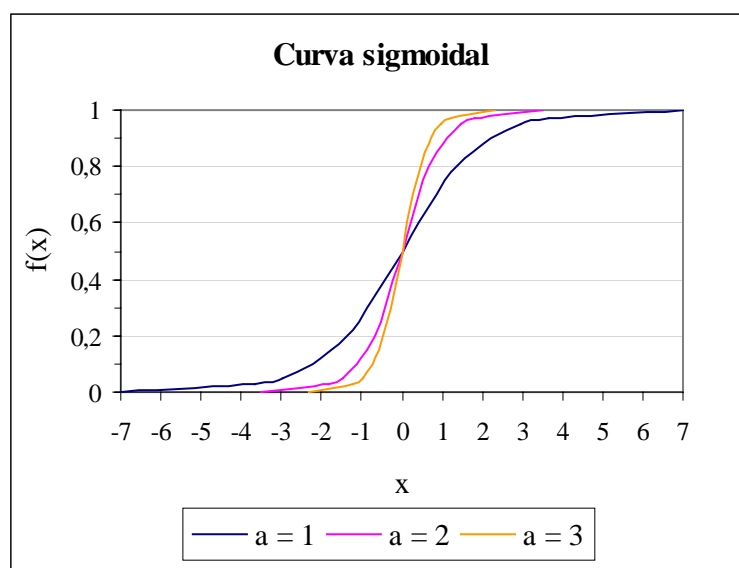


Figura 7.2 - Função sigmóide  $f(x) = 1/(1 + e^{-ax})$ .

Cabe ressaltar que a definição de números precisos para esses limites de máxima e de mínima satisfação não é a mais adequada. Isso porque, no que se refere aos aspectos quantitativos, a precisão da simulação é afetada por erros inerentes às curvas cota-volume e às medidas e estimativas das séries hidrológicas utilizadas no modelo de balanço hídrico. Quanto à estimativa do nível trófico, há outros fatores intervenientes no processo de eutrofização que não estão sendo considerados, como o aporte interno de fósforo. Desse modo, pode ser difícil diferenciar, de fato, as conseqüências associadas a pequenas variações em torno dos valores especificados para os limites de satisfação.

Uma abordagem mais apropriada seria, então, a especificação de intervalos de valores (números difusos) que corresponderiam à melhor e à pior condição de satisfação, com a utilização da teoria difusa para a manipulação algébrica das funções de satisfação. Tal abordagem não foi adotada devido ao prazo de desenvolvimento da dissertação, mas não compromete o resultado final da pesquisa, tendo-se em vista o objetivo de construir um protótipo do suporte metodológico proposto.

A principal simplificação adotada para a aplicação do suporte ao caso do Lago consiste da necessidade de serem estabelecidas as metas mensais de armazenamento e de nível d'água do reservatório, ou seja, a variação mensal esperada dos volumes armazenados ao longo de um ano hidrológico. Geralmente, em problemas de operação de reservatórios, o volume armazenado em cada período constitui a variável de decisão, ou seja, a incógnita do

problema, sendo obtida em função das variáveis de estado (vazões afluentes e vazões de demanda) e das restrições do sistema (balanço hídrico e armazenamentos máximo e mínimo, entre outras). No entanto, fez-se opção diferente, tendo em vista a especificidade do caso de aplicação, em que as restrições quanto aos armazenamentos máximo e mínimo são, essencialmente, função dos usos prioritários para paisagismo e recreação.

Conforme discutido nos itens 6.4 a 6.6, a manutenção da recreação e da composição paisagística como usos prioritários do Lago, por si só, já limita grandemente a possibilidade de variação dos níveis d'água. Além disso, considera-se que o esquema operativo vigente tende a ser mantido no futuro, haja vista sua contribuição para a boa qualidade da água do Lago. Por fim, os ciclos de enchimento e deplecionamento do lago Paranoá são sazonais, com periodicidade anual, e a transição entre eles ocorre de forma gradativa entre um ciclo e outro. Essas características permitem a proposição de metas mensais para o armazenamento, sem que isso se constitua em simplificação grosseira da realidade.

Ressalta-se que essa opção – pré-definição dos volumes armazenados em cada mês – simplifica sobremaneira a estimativa das vazões retiráveis em cada período da simulação. Sendo o armazenamento a variável de estado, a vazão derivável do reservatório, a ser distribuída entre os usos consuntivos, passa a ser a variável de decisão do problema. O cálculo da vazão retirada em cada mês  $t$  é feito, então, a partir da equação do balanço hídrico (Equação 7.4):

$$R_t = S_{t+1} - S_t - Qa_t + E_t \quad (7.4)$$

A partir dos pesos atribuídos aos usos consuntivos, é otimizada a alocação das vazões retiradas dentre esses usos, de modo a se obter o máximo benefício em cada período. É bom lembrar que essa hierarquia entre usos consuntivos pode variar ao longo do ano hidrológico, a depender das demandas de cada uso.

Dessa forma, a otimização da alocação das vazões retiradas do reservatório segue a Equação 7.5, em que se busca maximizar o grau de satisfação do conjunto obtido pela interseção dos objetivos operacionais de natureza consuntiva.

$$\max \mu_{global,t} = \sum_{j=1}^k w_{j,t} \cdot \mu_{O_{j,t}}(R_t) \quad (7.5)$$

em que:

$k$  = número de objetivos operacionais associados a usos consuntivos distintos;

$j$  = índice de cada objetivo operacional consuntivo,  $j \in [1, 2, \dots, k]$ ;

$t$  = índice de cada estágio (período) da simulação;

$O_{j,t}$  =  $j$ -ésimo objetivo operacional consuntivo avaliado no período  $t$  da simulação;

$\mu_{O_{j,t}}$  = grau de satisfação do objetivo  $O_{j,t}$  proporcionado pela alocação de parte da vazão  $R_t$  para o uso correspondente, obtido a partir da função de satisfação associada ao objetivo  $O_{j,t}$ ,  $\mu \in [0,1]$  de forma que o objetivo é completamente não satisfeito se  $\mu = 0$ , completamente atendido se  $\mu = 1$ , e parcialmente atendido se  $\mu \in ]0,1[$ ;

$w_{j,t}$  = peso do  $j$ -ésimo objetivo operacional consuntivo no período  $t$  da simulação,  $\sum w_{j,t} = 1$ ;

$\mu_{global,t}$  = grau de satisfação global dos objetivos operacionais associados aos usos consuntivos simulados;

$R_t$  = vazão total retirada do reservatório, no período  $t$ .

Como resultado, dispõem-se das séries de retiradas do reservatório alocadas entre os usos consuntivos avaliados. Conseqüentemente, têm-se os valores dos graus de satisfação dos objetivos operacionais associados aos usos consuntivos, proporcionados pela operação do reservatório em cada período  $t$  da simulação ( $\mu_{i, quant, t}$ ). A simulação é dividida em dois subperíodos do ano hidrológico, com vista a representar as diferenças entre a época seca (maio a outubro) e chuvosa (novembro a abril). Então, calcula-se a média dos  $\mu_{i, quant, t}$ , para os subperíodos seco e chuvoso e também para todo o período simulado.

Como os usos não-consuntivos, como a recreação, o paisagismo, a navegação e a pesca, também têm sua satisfação vinculada ao estado quantitativo do reservatório (volume armazenado ou nível d'água), há duas abordagens possíveis para essa questão. A primeira prevê que a satisfação desses usos foi considerada de forma implícita quando da definição das metas mensais de armazenamento. Nesse caso, o grau de satisfação quantitativo dos usos não-consuntivos pode ser equivalente a 1, caso se considere que a demanda quantitativa da recreação foi totalmente contemplada, ou a outro valor entre 0 e 1 que represente o quanto essa demanda é satisfeita pela regra operativa simulada.

Outra abordagem, que se apresenta como possibilidade de aperfeiçoamento da ferramenta, é a definição dos valores de armazenamentos máximo e mínimo correspondentes à satisfação total ou a nenhuma satisfação dos usos não-consuntivos, a exemplo do que é feito para os usos consuntivos. Dessa forma, por ocasião da definição das metas de armazenamento, o usuário da ferramenta pode verificar se o grau de satisfação resultante para cada um dos usos não-consuntivos está satisfatório e, caso contrário, em um processo iterativo, buscar uma melhor configuração dessas metas.

Vale registrar que, em virtude da definição dos volumes-meta mensais, se modificou a característica iterativa originalmente proposta, de acordo com a qual os volumes armazenados e os retirados em cada mês seriam determinados em função da melhor configuração de todos os usos simulados, consuntivos e não-consuntivos. Em outras palavras, o objetivo original era o de maximizar a satisfação global resultante da operação do reservatório, levando-se em conta as funções de satisfação associadas a cada uso e respeitando-se as restrições operacionais do reservatório. Com a simplificação feita, o objetivo passa a ser o de maximizar a satisfação obtida com os usos consuntivos, partindo-se do princípio que a satisfação dos usos não-consuntivos está adequada.

Por fim, como o volume armazenado é pré-fixado em cada período simulado, o tempo médio de residência hidráulica do reservatório (e também dos braços) pode ser calculado a partir das vazões afluentes e da evaporação direta do espelho d'água. Esse último dado, juntamente com as cargas de fósforo e a profundidade média de cada segmento do Lago, permite estimar a concentração de fósforo na água e, por conseguinte, a tendência de eutrofização do reservatório como um todo e dos braços do riacho Fundo (A), Gama (B), Torto (D) e Bananal (E), a partir do modelo simplificado desenvolvido pelo Cepis para lagos tropicais de água quente (item 3.3.1).

Apresenta-se, na Figura 7.3, o esquema da estrutura do protótipo do suporte metodológico aplicado ao caso do lago Paranoá.

Com relação à avaliação dos impactos de retiradas de vazão, tanto do Lago como dos tributários, para fins consuntivos (abastecimento, irrigação agrícola, irrigação paisagística e outros), cabem algumas considerações.

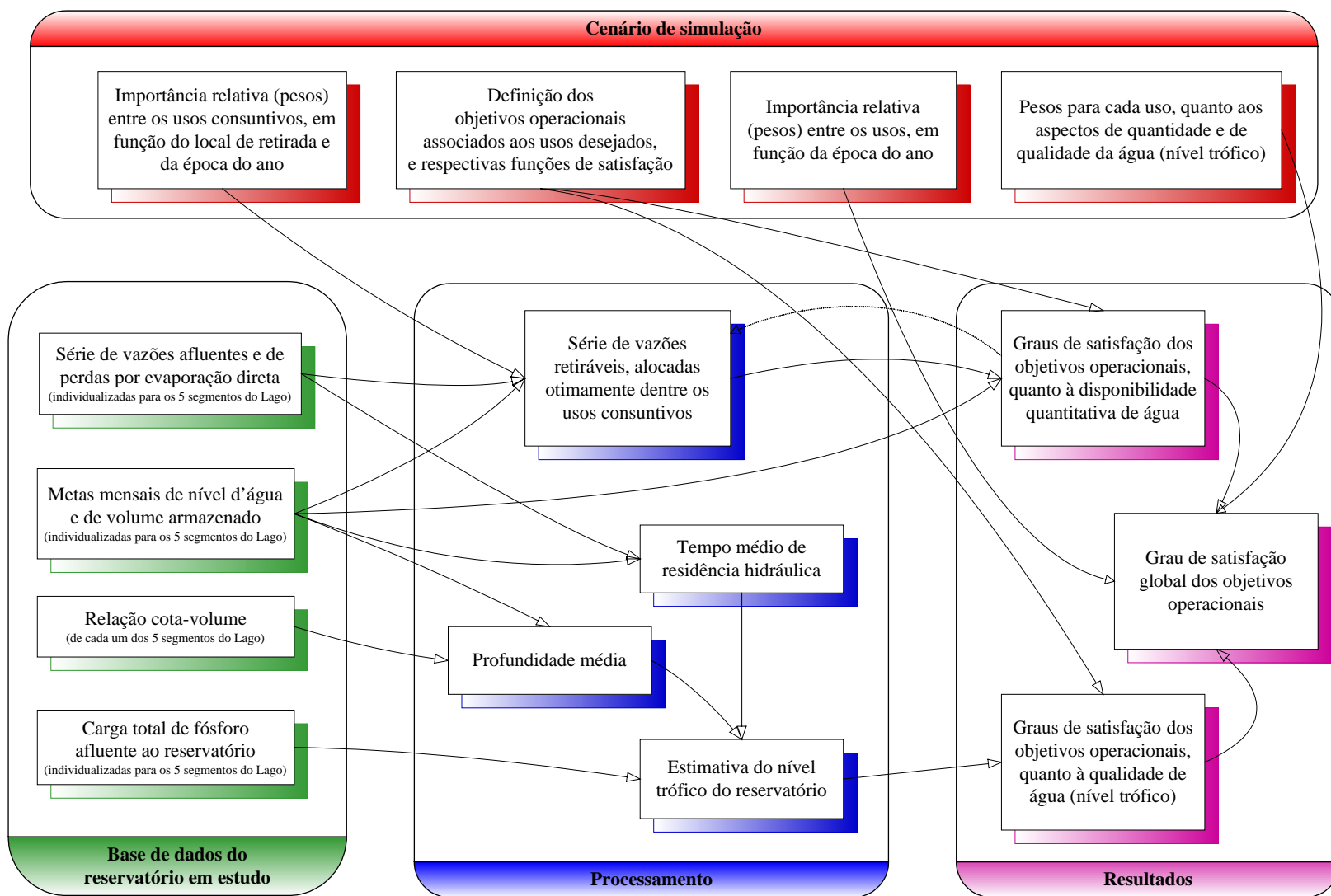


Figura 7.3 – Esquema do protótipo do suporte metodológico para apoio à gestão estratégica dos usos da água do lago Paranoá.

De fato, caso não sejam exportados efluentes para outras bacias, parte das vazões captadas retorna, direta ou indiretamente, ao Lago, seja via lançamento de galerias de águas pluviais e de efluentes tratados das ETEs, seja via infiltração e escoamento subsuperficial e subterrâneo. Por isso, a avaliação do impacto dessas retiradas de vazão sobre o balanço hídrico do Lago deve levar em conta esse retorno.

Além disso, o impacto dessas retiradas deve ser avaliado também no que se refere à alteração da capacidade de diluição dos efluentes lançados no Lago. Essa análise é particularmente importante no caso de retiradas feitas de tributários ou segmentos do Lago menos poluídos, uma vez que se retira água de qualidade superior, portanto, com maior capacidade de diluição, retornando-se água com qualidade inferior.

Deve-se lembrar, contudo, que o suporte metodológico foi implementado em nível de protótipo e, por isso, possui algumas limitações. Uma delas é a dificuldade de se avaliar o impacto das retiradas de vazão sobre o balanço hídrico de cada segmento do Lago. Isso porque seria necessário especificar os pontos de retorno ao Lago das vazões captadas, o que se constitui em tarefa complexa no caso de retornos difusos (efluentes de irrigação e de lavagem de ruas, por exemplo) e no caso da incorporação de vazões captadas para abastecimento público em sistemas integrados de distribuição de água.

Além disso, o protótipo não possibilita a estimativa do impacto dessas retiradas de vazão e posterior retorno ao Lago sobre a capacidade de diluição de efluentes nele lançados. Faz somente uma estimativa da concentração de fósforo na água do reservatório, a partir de modelo empírico de balanço de massas concebido por Vollenweider e aprimorado estatisticamente pelo Cepis. Esse modelo leva em conta a carga de fósforo afluente e a perda por sedimentação desse nutriente no corpo lacustre, mas não considera a concentração prévia de fósforo na água do reservatório.

Tendo em vista o exposto, para a estimativa do impacto das retiradas de vazão sobre o balanço hídrico do reservatório e sobre a capacidade de diluição de efluentes nele lançados (em última instância, sobre a tendência de eutrofização desse corpo d'água), o protótipo desenvolvido considera, em uma abordagem conservadora sob o ponto de vista do balanço hídrico, a exportação de efluentes para outras bacias nas simulações dos balanços hídricos de cada segmento. A estimativa do impacto das retiradas de vazão considerando-se a

hipótese de retorno de parte das vazões captadas dos corpos d'água da bacia do Lago apresenta-se como possibilidade de aperfeiçoamento futuro do protótipo.

#### **7.4 - APLICAÇÃO DO SUPORTE METODOLÓGICO AO CASO DO LAGO PARANOÁ**

O objetivo deste item é apresentar aplicações contrastantes do suporte metodológico ao caso do lago Paranoá, com vistas a evidenciar as diferenças de respostas da ferramenta e, assim, possibilitar a análise de consistência dessas respostas. Nesse sentido, em um primeiro momento, fez-se uma simulação (Simulação 1) buscando retratar a configuração atual de usos da água do Lago – recreação, paisagismo, produção de energia, pesca profissional, irrigação agrícola (a partir dos tributários) e diluição e depuração de efluentes – e outra (Simulação 2), em que também foram consideradas retiradas para abastecimento público. O jogo de pesos adotado na Simulação 1 reflete, de certa forma, o *status quo* do equilíbrio entre os usos, ou seja, a recreação e o paisagismo são usos prioritários, a pesca profissional e a irrigação agrícola são os usos menos relevantes e a produção de energia apresenta importância intermediária. Na Simulação 2, o jogo de pesos adotado manteve a mesma relação de importância entre os usos comuns às Simulações 1 e 2, sendo atribuída ao abastecimento público importância intermediária entre os usos prioritários (recreação e paisagismo) e a produção de energia.

Em um segundo momento, escolheu-se o cenário de utilização mais intensa da água do Lago, ao qual está associado o maior potencial de conflitos, e modificou-se o jogo de pesos de modo que a produção de energia recebesse maior importância dentre os usos consuntivos (Simulação 3). Esse procedimento teve a finalidade de buscar evidenciar diferenças nos graus de satisfação dos usos consuntivos devido a mudanças nas prioridades de satisfação das demandas. Isso pode ser particularmente interessante no âmbito de Comitês de Bacia, pois a variação das prioridades de usos permite identificar os *trade-offs* entre os usos.

A regra operativa adotada em todas as simulações é apresentada na Figura 7.4 a seguir. Considerando-se a pequena variação dos níveis d'água do Lago, assumiu-se que a regra operativa simulada atende totalmente as demandas quantitativas dos usos para paisagismo e pesca profissional.



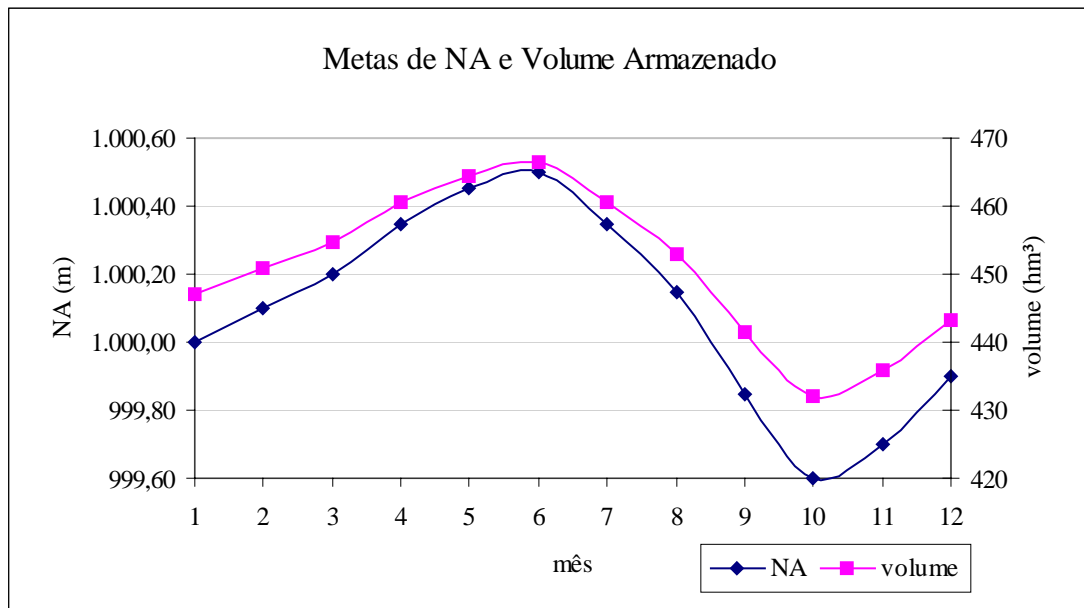


Figura 7.4 – Metas mensais de nível d’água e de volume armazenado no lago Paranoá, segundo o esquema operativo considerado nas simulações (dados: CEB, comunicação pessoal de Wagner Moreti).

Ressalta-se que, em todas as simulações, a utilização do Lago para diluição e depuração de efluentes foi avaliada somente quanto à tendência de eutrofização, na forma de cenários de aporte de fósforo. Está implícita a premissa de que esse uso é plenamente atendido na simulação e, por isso, não se atribuem pesos a ele.

Os dados de aporte de fósforo utilizados nas simulações foram estimados pelo Plano de Gestão e Preservação do Lago Paranoá (Concremat, 2004) e são apresentados na Tabela 7.2. Esses dados incluem as cargas pontuais das ETEs e as cargas difusas da drenagem pluvial e da infiltração de efluentes sanitários nas áreas não atendidas por sistemas coletivos de esgotamento.

Para a estimativa da tendência de evolução das cargas de fósforo, esse estudo definiu três cenários, que foram avaliados nas simulações. O cenário de referência segue a tendência atual de ocupação da bacia, em que há preponderância das demandas econômicas e sociais envolvidas no processo de expansão urbana sobre as restrições ambientais existentes. O cenário otimista se caracteriza pelo controle efetivo do ordenamento territorial, associado ao fortalecimento da gestão ambiental, e o cenário pessimista, pela não consideração das restrições ambientais quanto ao adensamento da bacia.

Tabela 7.2 – Cargas de fósforo total (kg/dia) estimadas para os cenários de expansão urbana da bacia do lago Paranoá (Concremat, 2003).

segmento	cenário de referência			cenário com controle ambiental efetivo			cenário sem controle ambiental efetivo		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
A	59,02	68,75	77,15	56,17	63,42	70,54	62,06	75,22	85,26
B	4,64	5,46	5,55	4,56	5,24	5,30	4,65	5,48	5,58
C	5,95	6,74	6,79	5,80	5,90	6,51	6,01	6,92	7,08
D	8,36	8,95	9,13	8,26	8,26	8,68	8,54	9,28	9,75
E	24,91	29,23	32,34	24,07	26,99	30,27	26,21	31,83	35,66
Lago	102,88	119,12	130,96	98,86	109,82	121,31	107,46	128,73	143,32

Em todas as simulações, não foram consideradas diferenças quanto à demanda para irrigação agrícola. Vale lembrar que a bacia do lago Paranoá não tem grande vocação agrícola, o que se reflete nas estimativas feitas para a demanda de água para irrigação na bacia, que aumenta somente 18% em 30 anos, conforme pode ser observado na Tabela 7.3 a seguir.

Esclarece-se que, como as retiradas de água para irrigação agrícola são feitas de tributários do Lago, a montante dos postos fluviométricos existentes, as retiradas atuais são contabilizadas automaticamente pelo modelo de balanço hídrico. Por isso, serão consideradas somente as demandas adicionais para os anos de 2010, 2020 e 2030, estimadas no Plano Diretor de Água e Esgotos do Distrito Federal (Magna Engenharia, 2000a). Como a estimativa da demanda de irrigação está agregada para toda a bacia do lago Paranoá, assumiu-se que essa demanda é igualmente dividida entre o riacho Fundo e o ribeirão do Gama, tributários que concentram a maioria dos núcleos agrícolas da bacia do Lago.

Tabela 7.3 – Demandas de água para irrigação na bacia do lago Paranoá (dados: Magna Engenharia, 2000a).

Ano	2000	2010	2020	2030
Demanda total de água para irrigação (l/s)	820	868	920	962
Demanda adicional de água (l/s), em relação ao ano 2000	0	48	100	142

Também pelo fato de as retiradas para irrigação serem feitas de tributários, não são pertinentes considerações sobre o estado trófico da água do Lago. Nessa condição, atribui-se, automaticamente, peso igual a 1 para a disponibilidade quantitativa e 0 para a condição trófica do reservatório.

Apresentam-se, a seguir, as simulações realizadas.

#### 7.4.1 - Simulação 1

Os usos e respectivos pesos considerados na primeira simulação são apresentados na Tabela 7.4. Esses valores foram atribuídos respeitando-se as condições das Equações 7.1 e 7.2, de que o somatório dos pesos  $w_{i, quanti}$  e  $w_{i, quali}$ , para cada uso  $i$ , bem como dos pesos  $w_i$  entre esses usos, deve ser igual a 1. As funções de satisfação de cada uso estão apresentadas na Tabela 7.5.

Tabela 7.4 – Configuração de usos da primeira simulação.

Uso	Peso		Peso em relação aos outros usos
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	
Recreação	0,4	0,6	0,3
Paisagismo	0,6	0,4	0,3
Produção de energia	1	0	0,2
Pesca profissional	0,3	0,7	0,1
Irrigação agrícola (tributários)	1	0*	0,1

\* Consideração não pertinente para o uso.

Como discutido no tópico 3.1.1, a produção de energia pode ser considerada uso consuntivo, pois, de fato, impõe restrições a outros usos consuntivos a montante do

reservatório. No caso dessa simulação, então, a produção de energia e a irrigação agrícola foram os únicos usos consuntivos considerados. Para otimizar a alocação das vazões deriváveis do Lago dentre esses usos, assumiu-se que a produção de energia é relativamente mais importante que a irrigação agrícola, adotando-se os pesos de 0,5 para a produção de energia e de 0,25 para irrigação agrícola a partir do riacho Fundo e de 0,25 a partir do ribeirão do Gama, para todos os meses do ano.

Tabela 7.5 –Definição das funções de satisfação dos usos da primeira simulação.

Uso	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago		condição trófica do Lago	
	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$	$\mu = 1$
Irrigação agrícola (para cada tributário)	$Q_{\text{captada}} = 0 \text{ l/s}$	$Q_{\text{captada}} = 24 \text{ l/s (2010)}$ $Q_{\text{captada}} = 50 \text{ l/s (2020)}$ $Q_{\text{captada}} = 71 \text{ l/s (2030)}$	(3)	
Recreação	$\mu = \frac{\text{meses com NA} \geq 1.000,00}{12} = 0,625^{(1)}$		[P] = 0,05 mg/l	[P] = 0,025 mg/l
Paisagismo	1 <sup>(2)</sup>		[P] = 0,05 mg/l	[P] = 0,035 mg/l
Produção de energia	$\mu = \frac{\text{vazão turbinada}}{\text{vazão turbinável}}$		(3)	
Pesca profissional	1 <sup>(2)</sup>		[P] = 0,06 mg/l	[P] = 0,035 mg/l

(1): No caso da regra operativa simulada, em 4,5 dos 12 meses do ano, o NA é menor que 1.000,00 m. (2): Considerou-se que a regra operativa simulada atende plenamente a demanda quantitativa desse uso. (3): Consideração não relevante para esse uso.

Para a definição das funções de satisfação da recreação e da produção de energia, quanto às demandas quantitativas, adotou-se abordagem diferente da função sigmoideal. No caso da recreação, vale registrar que a antiga regra operativa do Lago tinha como meta a manutenção do nível d'água em torno da cota 1.000,00 m. Segundo informação da Federação Náutica de Brasília, os cais e rampas dos clubes foram projetados de acordo com essa cota e, quando há baixas excessiva do nível d'água, impossibilitam-se a colocação de barcos na água e a atracação nos cais que ficam no seco. Desse modo, estimou-se o grau de satisfação quantitativa da recreação por meio da proporção de tempo, no ano, em que o nível d'água é maior ou igual a 1000,00 m. Para a regra operativa simulada, essa condição é observada em 4,5 meses do ano (equivalente a 62,5% do tempo).

A produção de energia, sendo o último uso consuntivo que se faz da água do Lago, é afetada pela introdução de outros usos consuntivos ou o incremento dos usos já realizados. Nesse sentido, é interessante que o grau de satisfação quantitativa desse uso reflita o quanto ele é prejudicado pelos outros usos consuntivos simulados. Essa noção pode ser obtida por meio da relação entre a vazão disponível para geração de energia na barragem e a vazão total que estaria disponível para tal, caso os demais usos consuntivos simulados não existissem.

A definição dos limites das funções de satisfação com relação à condição trófica da água foi auxiliada pela distribuição de probabilidades do modelo desenvolvido pelo Cepis. Considerando os usos para recreação e paisagismo, o limite máximo adotado para a concentração de fósforo na água foi de 0,050 mg/L ( $\mu = 0$ ). Para essa concentração de fósforo, a probabilidade de o Lago ser mesotrófico é de 76%, mas há 15% de probabilidade de o mesmo ser eutrófico. Considerou-se essa probabilidade a máxima aceitável, tendo-se em vista os prejuízos a esses usos da água associados à eutrofização.

Para a pesca profissional, adotou-se limite máximo menos restritivo para a concentração de fósforo, de 0,060 mg/L (66% de probabilidade de ser mesotrófico e 30% de ser eutrófico). Nesse caso, partiu-se do princípio de que o equilíbrio entre a pesca e a eutrofização se dá em patamar mais alto, pois, de um lado, a retirada de peixes diminui o risco de ocorrência de eventos indesejáveis associados à eutrofização (mortandade maciça, por exemplo) e, de outro, uma maior disponibilidade de nutrientes resulta em maior produtividade pesqueira.

Adotou-se a concentração de fósforo de 0,025 mg/L como valor ideal para a recreação ( $\mu = 1$ ). Para essa concentração, é nula a probabilidade de eutrofização e há 60% de chance de o Lago ser oligotrófico. Para o paisagismo e a pesca profissional, usos comparativamente menos exigentes, definiu-se como ideal a concentração de 0,035 mg/L, para a qual há 72% de probabilidade de o Lago ser mesotrófico e cerca de 3% de ser eutrófico.

Deve-se lembrar que os graus de satisfação quanto à condição trófica são obtidos para o Lago como um todo e também para os braços A (riacho Fundo), B (Gama/Cabeça de Veado), D (Torto) e E (Bananal). Adotou-se, para a recreação e o paisagismo, somente o valor referente ao Lago, que pode ser entendido como um indicador global da satisfação desses usos proporcionado pelo reservatório.

Já no caso da pesca profissional, autorizada somente nos braços A e E, o grau de satisfação foi obtido pela média ponderada entre o valor global do Lago e os valores observados nesses dois braços (Equação 7.6). Como o braço do riacho Fundo é o mais piscoso do Lago e o que recebe maior aporte de nutrientes, considerou-se que a observância de condições favoráveis à pesca profissional nesse braço é relativamente mais importante.

$$\mu_{quali, pesca\ profissional} = \frac{\mu_{quali, pesca, Lago} + 2 \cdot \mu_{quali, pesca, A} + \mu_{quali, pesca, E}}{4} \quad (7.6)$$

Os resultados da Simulação 1 são apresentados nas Tabelas 7.6 a 7.8 a seguir.

Tabela 7.6 – Resultados da Simulação 1, considerando o cenário de referência para o aporte de fósforo.

Uso	Graus de satisfação				Observações gerais
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	de cada uso	global	
<b>Cenário de referência para o aporte de fósforo (2010)</b>					
Recreação	0,625	0,999	0,849	0,933	$\mu_{quali} = 0,003$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,767$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0,005$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,999$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,996	-	0,996		$\mu_{quanti} = 0,995$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,998$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,702	0,792		$\mu_{quali} = 0,405$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,999$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
<b>Cenário de referência para o aporte de fósforo (2020)</b>					
Recreação	0,625	0,988	0,843	0,916	$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,137$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,832$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,992	-	0,992		$\mu_{quanti} = 0,990$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,995$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,500	0,650		$\mu_{quali} = 0,012$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,977$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
<b>Cenário de referência para o aporte de fósforo (2030)</b>					
Recreação	0,625	0,950	0,820	0,906	$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,018$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,12$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,989	-	0,989		$\mu_{quanti} = 0,986$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,993$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,458	0,621		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,833$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		

Tabela 7.7 – Resultados da Simulação 1, considerando o cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago.

Uso	Graus de satisfação				Observações gerais
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	de cada uso	global	
<b>Cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo (2010)</b>					
Recreação	0,625	1	0,850	0,943	$\mu_{quali} = 0,008$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,857$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0,033$ (braço A) $\mu_{quali} = 1$ (braços B, D e E)
Produção de energia	0,996	-	0,996		$\mu_{quanti} = 0,995$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,998$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,843	0,890		$\mu_{quali} = 0,686$ (braço A) $\mu_{quali} = 1$ (braços B, D e E)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
<b>Cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo (2020)</b>					
Recreação	0,625	0,996	0,848	0,921	$\mu_{quali} = 0,01$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,432$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,985$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,992	-	0,992		$\mu_{quanti} = 0,990$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,995$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,547	0,683		$\mu_{quali} = 0,096$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,995$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
<b>Cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo (2030)</b>					
Recreação	0,625	0,984	0,841	0,914	$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,072$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,598$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,989	-	0,989		$\mu_{quanti} = 0,986$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,993$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,491	0,644		$\mu_{quali} = 0,006$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,954$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		



Tabela 7.8 – Resultados da Simulação 1, considerando o cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago.

Uso	Graus de satisfação				Observações gerais
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	de cada uso	global	
<b>Cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo (2010)</b>					
Recreação	0,625	0,997	0,848	0,925	$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,568$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,994$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,996	-	0,996		$\mu_{quanti} = 0,995$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,998$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,582	0,707		$\mu_{quali} = 0,166$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,997$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
<b>Cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo (2020)</b>					
Recreação	0,625	0,963	0,828	0,910	$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,03$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,2$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,992	-	0,992		$\mu_{quanti} = 0,986$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,993$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,470	0,629		$\mu_{quali} = 0,001$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,876$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
<b>Cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo (2030)</b>					
Recreação	0,625	0,809	0,736	0,872	$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,002$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,003$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,989	-	0,989		$\mu_{quanti} = 0,986$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,993$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,335	0,534		$\mu_{quali} = 0$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,339$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		

## 7.4.2 - Simulação 2

Os usos e respectivos pesos considerados na segunda simulação são apresentados na Tabela 7.9. Foram mantidos os mesmos usos da simulação 1, acrescidos de retiradas de água de tributários e do Lago para fins de abastecimento. Como mencionado anteriormente, os pesos indicativos da importância relativa entre os usos foram definidos de modo a manter a mesma relação de importância entre os usos comuns às Simulações 1 e 2.

Tabela 7.9 – Configuração de usos da segunda simulação.

Uso	Peso		Peso em relação aos outros usos
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	
Recreação	0,4	0,6	0,24
Paisagismo	0,6	0,4	0,24
Produção de energia	1	0	0,16
Pesca profissional	0,3	0,7	0,08
Irrigação agrícola (tributários)	1	0*	0,08
Abastecimento público (tributários)	1	0*	0,20
Abastecimento público (Lago)	0,5	0,5	

\* Consideração não pertinente para o uso.

Semelhantemente às retiradas para irrigação feitas de tributários, não são pertinentes considerações sobre o estado trófico do Lago para as retiradas de água dos tributários para fins de abastecimento. Nessa condição, atribui-se, automaticamente, peso igual a 1 para a disponibilidade quantitativa e 0 para a condição trófica do reservatório. Como há duas formas de utilização da água para abastecimento (captações em tributários e no Lago), obtém-se o grau de satisfação média desse uso por meio da Equação 7.7.

$$\bar{\mu}_{abast} = \frac{(\bar{\mu}_{quanti,trib} \cdot W_{quanti,trib} + \bar{\mu}_{quali,trib} \cdot W_{quali,trib}) + (\bar{\mu}_{quali,Lago} \cdot W_{quali,Lago} + \bar{\mu}_{quali,Lago} \cdot W_{quali,Lago})}{2} \quad (7.7)$$

Para subsidiar a definição das funções de satisfação das retiradas de água para abastecimento, foram utilizados dados estimativos do Plano Diretor de Água e Esgotos do Distrito Federal (Magna Engenharia, 2000b) das demandas de algumas áreas que, pela proximidade, podem ser atendidas pelo Lago. Esses dados estão apresentados na Tabela 7.10. Esclarece-se que se adotou essa hipótese somente para compor o cenário de simulação, não havendo nenhum compromisso em retratar intenções reais de planejamento quanto ao abastecimento dessas áreas.

Tabela 7.10 – Estimativas de demandas de água para abastecimento de algumas áreas da bacia do lago Paranoá (dados: Magna Engenharia, 2000b).

Local	Demandas estimadas de água (l/s)		
	2010	2020	2030
Setor Habitacional São Bartolomeu	19	50	59
Setor Habitacional Jardim Botânico	59	93	109
Setor Habitacional Dom Bosco	36	47	52
Condomínios do Paranoá	14	27	34
Paranoá (zona urbana)	114	207	248
Setor Habitacional Taquari	38	104	130
Total	280	528	632

Além disso, buscaram-se dados a respeito de estudos ou projetos existentes para novas captações de água na bacia do lago Paranoá para abastecimento público, no ribeirão Bananal (tributário do lago Paranoá) e no córrego Taquara (afluente do ribeirão do Gama, que é tributário do Lago).

Segundo o Estudo de Pré-Viabilidade Técnica e Ambiental para o Aproveitamento do Ribeirão Bananal (NCA, 2003), a captação nesse corpo d'água pode ser feita por meio de retiradas em regime de vazão fixa ou sazonal. As vazões podem atingir até 90% da  $Q_{7,10}$ , restrição que tem fundamentação técnica para outorgas com vazão fixa (válida para todos os meses do ano) ou para o mês mais seco (no caso da outorga sazonal). Contudo, no caso da outorga sazonal, caso sejam respeitados tanto o limite máximo de retiradas no mês mais seco como a garantia de manutenção de vazão ecológica em todos os meses, não há razão para se impedirem retiradas maiores que 90% da  $Q_{7,10}$  nos meses em que o ribeirão estiver

veiculando vazões muito maiores. Por isso, esse estudo sugere a possibilidade de se captar, em cada mês, 50% da respectiva vazão média mensal de longo período.

Foram identificados dois pontos de captação possíveis: 1) a montante da confluência com o córrego Acampamento, dentro da área do Parque Nacional de Brasília, ou 2) a jusante dessa confluência, junto à EPIA-003. No primeiro ponto de captação, apesar da menor vazão captável, a qualidade da água é muito boa tendo em vista a proteção do manancial. Já na segunda alternativa, a vazão captável é bem maior, mas há riscos à qualidade da água, pois o córrego Acampamento recebe contribuição da drenagem do Setor de Oficinas Norte e de trecho da margem esquerda do ribeirão Bananal, tornando necessária a implementação de programa de controle do uso do solo nessas áreas.

As vazões captáveis nesses dois pontos são apresentadas na Tabela 7.11. Considerou-se, nesta simulação, a situação mais desfavorável, ou seja, a captação de vazão média anual de 1.172 l/s (o protótipo não permite a consideração de vazões diferentes para cada mês).

Tabela 7.11 – Vazões captáveis no ribeirão Bananal (dados: NCA, 2003).

Local de captação		Vazão captável (l/s)											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1	90% $Q_{7,10}$	346											
	50% $Q_{\text{méd.mensal}}$	718	731	767	695	519	442	402	361	351	489	559	682
	média anual da retirada sazonal	560											
2	90% $Q_{7,10}$	726											
	50% $Q_{\text{méd.mensal}}$	1.503	1.530	1.605	1.455	1.086	925	841	755	736	1.025	1.171	1.428
	média anual da retirada sazonal	1.172											

A Caesb possui, ainda, estudo para captação de vazão fixa de 290 l/s na bacia do ribeirão do Gama (240 l/s no córrego Taquara e 50 l/s no córrego Catetinho Baixo), também para abastecimento público (Concremat, 2001). Essa captação não foi implementada até o momento devido a dificuldades de obtenção do licenciamento ambiental, uma vez que o ponto de captação se encontra em área de preservação federal. Isso, no entanto, não impede que essa captação seja considerada na segunda simulação, pois se trata de uso possível da água e o cenário é hipotético.

Desse modo, foram consideradas, na Simulação 2, as funções de satisfação dos usos apresentadas na Tabela 7.12.

Tabela 7.12 – Definição das funções de satisfação dos usos da segunda simulação.

Uso	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago		condição trófica do Lago	
	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$	$\mu = 1$
Abastecimento				
ribeirão Bananal	$Q_{\text{captada}} = 0 \text{ l/s}$	$Q_{\text{captada}} = 1172 \text{ l/s}$ (2010, 2020 e 2030)	(3)	
ribeirão do Gama (córregos Taquara e Catetinho Baixo)	$Q_{\text{captada}} = 0 \text{ l/s}$	$Q_{\text{captada}} = 290 \text{ l/s}$ (2010, 2020 e 2030)	(3)	
Lago (segmento central)	$Q_{\text{captada}} = 0 \text{ l/s}$	$Q_{\text{captada}} = 280 \text{ l/s}$ (2010) $Q_{\text{captada}} = 528 \text{ l/s}$ (2020) $Q_{\text{captada}} = 632 \text{ l/s}$ (2030)	[P] = 0,04 mg/l	[P] = 0,025 mg/l
Irrigação agrícola (para cada tributário)	$Q_{\text{captada}} = 0 \text{ l/s}$	$Q_{\text{captada}} = 24 \text{ l/s}$ (2010) $Q_{\text{captada}} = 50 \text{ l/s}$ (2020) $Q_{\text{captada}} = 71 \text{ l/s}$ (2030)	(3)	
Recreação	$\mu = \frac{\text{meses com NA} \geq 1.000,00}{12} = 0,625^{(1)}$		[P] = 0,05 mg/l	[P] = 0,025 mg/l
Paisagismo	1 <sup>(2)</sup>		[P] = 0,05 mg/l	[P] = 0,035 mg/l
Produção de energia	$\mu = \frac{\text{vazão turbinada}}{\text{vazão turbinável}}$		(3)	
Pesca profissional	1 <sup>(2)</sup>		[P] = 0,06 mg/l	[P] = 0,035 mg/l

(1): No caso da regra operativa simulada, em 4,5 dos 12 meses do ano, o NA é menor que 1.000,00 m. (2): Considerou-se que a regra operativa simulada atende plenamente a demanda quantitativa desse uso. (3): Consideração não relevante para esse uso.

A exemplo da recreação, adotou-se a concentração de fósforo de 0,025 mg/L como valor ideal para o abastecimento feito a partir de captação no Lago. O limite máximo adotado para esse uso foi de 0,040 mg/L, que corresponde a cerca de 18% de probabilidade de o Lago ser oligotrófico, 75% de ser mesotrófico e 6% de ser eutrófico.

Os resultados da Simulação 2 são apresentados nas Tabelas 7.13 a 7.15 a seguir.

Tabela 7.13 – Resultados da Simulação 2, considerando o cenário de referência para o aporte de fósforo.

Uso	Graus de satisfação				Observações gerais
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	de cada uso	global	
Cenário de referência para o aporte de fósforo (2010)					
Recreação	0,625	0,996	0,848	0,915	$\mu_{\text{quali}} = 0,003$ (braço A) $\mu_{\text{quali}} = 0,001$ (braço E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{\text{quali}} = 0,005$ (braço A) $\mu_{\text{quali}} = 0,002$ (braço E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,866	-	0,866		$\mu_{\text{quanti}} = 0,822$ (mai-out) $\mu_{\text{quanti}} = 0,909$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,521	0,665		$\mu_{\text{quali}} = 0,405$ (braço A) $\mu_{\text{quali}} = 0,274$ (braço E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Irrig. agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,989*	0,997		$\mu_{\text{quali}} = 0$ (braços A e E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Cenário de referência para o aporte de fósforo (2020)					
Recreação	0,625	0,965	0,829	0,877	$\mu_{\text{quali}} = 0$ (braços A e E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{\text{quali}} = 0$ (braços A e E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,843	-	0,843		$\mu_{\text{quanti}} = 0,792$ (mai-out) $\mu_{\text{quanti}} = 0,894$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,257	0,480		$\mu_{\text{quali}} = 0,012$ (braço A) $\mu_{\text{quali}} = 0,006$ (braço E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Irrig. agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,700*	0,925		$\mu_{\text{quali}} = 0$ (braços A e E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Cenário de referência para o aporte de fósforo (2030)					
Recreação	0,625	0,847	0,758	0,830	$\mu_{\text{quali}} = 0$ (braços A e E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{\text{quali}} = 0$ (braços A e E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,832	-	0,832		$\mu_{\text{quanti}} = 0,778$ (mai-out) $\mu_{\text{quanti}} = 0,886$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,250	0,475		$\mu_{\text{quali}} = 0$ (braços A e E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)
Irrig. agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,140*	0,785		$\mu_{\text{quali}} = 0$ (braços A e E) $\mu_{\text{quali}} = 1$ (braços B e D)

\* referente à captação no Lago

Tabela 7.14 – Resultados da Simulação 2, considerando o cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago.

Uso	Graus de satisfação				Observações gerais
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	de cada uso	global	
Cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo (2010)					
Recreação	0,625	0,998	0,849	0,926	$\mu_{quali} = 0,008$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,003$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0,033$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,007$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,866	-	0,866		$\mu_{quanti} = 0,822$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,909$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,709	0,796		$\mu_{quali} = 0,686$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,464$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrig. agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,996*	0,999		$\mu_{quali} = 1$ (braços B e D) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo (2020)					
Recreação	0,625	0,989	0,844	0,896	$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,843	-	0,843		$\mu_{quanti} = 0,792$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,894$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,309	0,517		$\mu_{quali} = 0,096$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,097$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrig. agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,948*	0,987		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Cenário de aporte de fósforo com controle ambiental efetivo (2030)					
Recreação	0,625	0,952	0,821	0,867	$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,832	-	0,832		$\mu_{quanti} = 0,778$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,886$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,253	0,477		$\mu_{quali} = 0,006$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,002$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)E)
Irrig. agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,576*	0,894		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)

\* referente à captação no Lago

Tabela 7.15 – Resultados da Simulação 2, considerando o cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago.

Uso	Graus de satisfação			Observações gerais	
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	de cada uso		global
Cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo (2010)					
Recreação	0,625	0,993	0,846	0,904	$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,866	-	0,866		$\mu_{quanti} = 0,822$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,909$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,357	0,550		$\mu_{quali} = 0,166$ (braço A) $\mu_{quali} = 0,095$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,971*	0,993		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo (2020)					
Recreação	0,625	0,885	0,885	0,841	$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	1	1		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,843	-	0,843		$\mu_{quanti} = 0,792$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,894$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,250	0,475		$\mu_{quali} = 0,001$ (braço A) $\mu_{quali} = 0$ (braço E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,220*	0,805		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo (2030)					
Recreação	0,625	0,524	0,565	0,776	$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	0,992	0,997		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,832	-	0,832		$\mu_{quanti} = 0,778$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,886$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,249	0,474		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,011*	0,753		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)

\* referente à captação no Lago



### 7.4.3 - Simulação 3

Os usos e respectivos pesos considerados na terceira simulação são apresentados na Tabela 7.16. Foram mantidos os mesmos usos da Simulação 2, alterando-se o jogo de pesos de modo que a produção de energia seja o uso consuntivo mais importante. Os pesos indicativos, para cada uso, da importância relativa da disponibilidade quantitativa e da condição trófica da água não sofreram modificação.

Tabela 7.16 – Configuração de usos da terceira simulação.

Uso	Peso		Peso em relação aos outros usos
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	
Recreação	0,4	0,6	0,25
Paisagismo	0,6	0,4	0,25
Produção de energia	1	0	0,25
Pesca profissional	0,3	0,7	0,15
Irrigação agrícola (tributários)	1	0*	0,05
Abastecimento público (tributários)	1	0*	0,05
Abastecimento público (Lago)	0,5	0,5	

\* Consideração não pertinente para o uso.

Adotaram-se as mesmas funções de satisfação da Simulação 2 (Tabela 7.12, à página 144).

Como mencionado anteriormente, escolheu-se, para essa simulação, o cenário de utilização mais intensa da água do Lago. Assim, o cenário adotado foi o do ano 2030, sem controle ambiental efetivo da ocupação da bacia de drenagem do Lago, que se caracteriza pelas maiores demandas quantitativas de água para os usos consuntivos e pelo maior aporte de cargas de fósforo ao reservatório.

Os resultados da simulação 3 são apresentados na Tabela 7.17 a seguir.

Tabela 7.17 – Resultados da Simulação 3, para o ano de 2030 e o cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago.

Uso	Graus de satisfação				Observações gerais
	disponibilidade de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago	de cada uso	global	
Cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo (2030)					
Recreação	0,625	0,542	0,575	0,763	$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Paisagismo	1	0,993	0,997		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Produção de energia	0,844	-	0,844		$\mu_{quanti} = 0,801$ (mai-out) $\mu_{quanti} = 0,887$ (nov-abr)
Pesca profissional	1	0,249	0,474		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)
Irrigação agrícola (tributários)	1	-	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	0,995	0,012*	0,749		$\mu_{quali} = 0$ (braços A e E) $\mu_{quali} = 1$ (braços B e D)

\* referente à captação no Lago

#### 7.4.4 - Análise dos resultados das simulações

Como era de se esperar, analisando-se as Simulações 1 e 2, observa-se que, à medida que se intensificaram as condições de utilização da água do Lago, os graus de satisfação global dos usos diminuíram. Isso se verificou, também, para as demandas quanto à disponibilidade de vazão ou de nível d'água e para as preferências quanto à condição trófica do Lago.

Nas Tabelas 7.18 e 7.19, são feitas comparações dos resultados das Simulações 1 e 2 para o ano de 2030, considerando-se os cenários opostos de aporte de fósforo (com e sem efetivo controle ambiental da ocupação urbana), com o objetivo de evidenciar as diferenças dos resultados obtidos. Observa-se, como esperado, que, no pior cenário – de maior aporte de fósforo e das maiores retiradas de água para fins consuntivos, com subsequente diminuição da capacidade de diluição – os graus de satisfação dos usos quanto à condição trófica foram menores.

Tabela 7.18 – Comparação dos resultados da Simulação 1, ano 2030, para os cenários com e sem controle ambiental da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago.

Simulação 1 (2030)	Graus de satisfação						
	disp. de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago		de cada uso		global	
	com e sem controle ambiental	com controle ambiental	sem controle ambiental	com controle ambiental	sem controle ambiental	com controle ambiental	sem controle ambiental
Recreação	0,625	0,984	0,809	0,841	0,736	0,914	0,872
Paisagismo	1	1	1	1	1		
Produção de energia	0,989	-	-	0,989	0,989		
Pesca profissional	1	0,491	0,335	0,644	0,534		
Irrig. agrícola (tributários)	1	-	-	1	1		

Tabela 7.19 – Comparação dos resultados da Simulação 2, ano 2030, para os cenários com e sem controle ambiental da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago.

Simulação 2 (2030)	Graus de satisfação						
	disp. de vazão ou nível d'água no Lago	condição trófica do Lago		de cada uso		global	
	com e sem controle ambiental	com controle ambiental	sem controle ambiental	com controle ambiental	sem controle ambiental	com controle ambiental	sem controle ambiental
Recreação	0,625	0,952	0,524	0,821	0,565	0,867	0,776
Paisagismo	1	1	0,992	1	0,997		
Produção de energia	0,832	-	-	0,832	0,832		
Pesca profissional	1	0,253	0,249	0,477	0,474		
Irrig. agrícola (tributários)	1	-	-	1	1		
Abastecimento (tributários e Lago)	1	0,576*	0,011*	0,894	0,753		

\* referente à captação no Lago

Analisando-se as Tabelas 7.18 e 7.19 (bem como as Tabelas 7.6 a 7.8 e 7.13 a 7.15), verifica-se que a produção de energia, em todos os cenários das Simulações 1 e 2, foi penalizada para garantir o total atendimento aos demais usos consuntivos considerados ( $\mu_{quanti} < 1$ ). Isso se deve, por um lado, aos jogos de pesos adotados nessas duas

simulações, em que não foi conferida importância relativa suficientemente grande a esse uso para evitar que os outros usos consuntivos preponderassem sobre ele no processo de alocação ótima das vazões deriváveis do Lago.

Por outro lado, verifica-se, a partir da análise do resultado da Simulação 3, que, apesar de a produção de energia ter recebido o maior peso dentre os usos consuntivos, seu grau de satisfação não aumentou significativamente. Isso se deve ao fato de que as demandas para abastecimento e irrigação são, na maior parte do tempo, pequenas em face da disponibilidade total de água para usos consuntivos, fazendo com que ainda seja interessante para o sistema que a produção de energia seja o uso penalizado.

Uma análise mais detalhada nesse sentido pode ser feita a partir da comparação gráfica dos resultados das Simulações 2 e 3 (ano 2030, sem controle ambiental da ocupação urbana). Nas Figuras 7.5 e 7.6, são apresentadas as curvas, ao longo de toda a simulação, das retiradas para abastecimento e dos graus de satisfação da produção de energia. Verifica-se que, na Simulação 3, as demandas para abastecimento foram penalizadas nos períodos críticos para favorecer a produção de energia. Isso se reflete no aumento do grau de satisfação desse uso para o período de maio a outubro, correspondente à estiagem – de 0,778 na Simulação 2, para 0,801 na Simulação 3. No restante do período, o padrão de satisfação da produção de energia foi idêntico ao da Simulação 2.

Convém registrar, ainda, que foi simulada a condição mais desfavorável ao balanço hídrico do reservatório, ou seja, a de exportação dos efluentes gerados pelas vazões captadas nos tributários e no Lago. Como, na realidade, parte dessas retiradas retorna ao Lago, seu impacto sobre a produção de energia é menor.

Analisando-se os resultados detalhados de cada simulação, pode-se observar que a produção de energia é mais prejudicada no período seco que no chuvoso. Isso ocorreria também com os demais usos consuntivos, caso outros jogos de pesos (produção de energia mais importante) tivessem sido adotados, e está de acordo com o esperado. Devido à restrição de variação de nível d'água, a menor afluência na estiagem limita a vazão retirável do reservatório nesse período, fazendo com que o potencial de conflitos entre usos da água seja maior nesse período. Observa-se, também, que os braços A e E são os mais

comprometidos quanto ao nível trófico, pois recebem os maiores aportes de nutrientes, como era esperado.

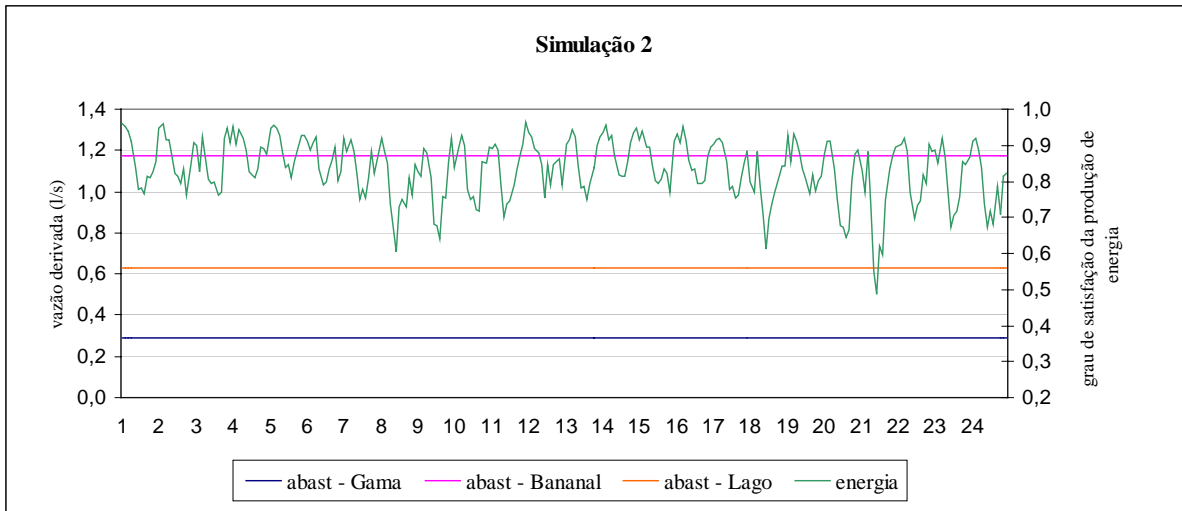


Figura 7.5 – Resultados da Simulação 2 (vazão retirada para abastecimento e grau de satisfação da produção de energia, ao longo de todo o período simulado), para o ano de 2030 e cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana de drenagem do Lago.

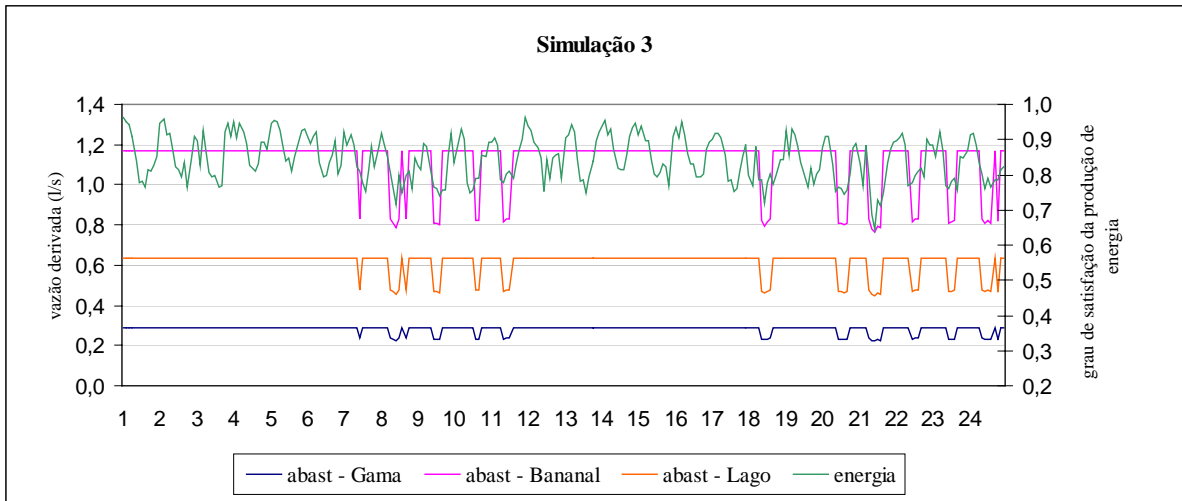


Figura 7.6 – Resultados da Simulação 3 (vazão retirada para abastecimento e grau de satisfação da produção de energia, ao longo de todo o período simulado), para o ano de 2030 e cenário de aporte de fósforo sem controle ambiental efetivo da ocupação urbana da bacia de drenagem do Lago.

## **7.5 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA**

A avaliação dos resultados da presente pesquisa foi feita por meio de análise de consistência das respostas fornecidas nas simulações realizadas e de consultas a especialistas, usuários e gestores.

### **7.5.1 - Análise de consistência das respostas do protótipo do suporte metodológico**

Pode-se observar que os resultados das simulações apresentadas no item 7.4 estão coerentes com os cenários simulados. Quanto mais intensas as condições de utilização da água do Lago, seja pelo aumento das retiradas de água para irrigação e para abastecimento, seja pelo aumento do aporte das cargas de fósforo ao reservatório, menores foram os graus de satisfação dos usos e, conseqüentemente, maiores foram os potenciais de conflitos entre esses usos.

Não foi feita calibração nem análise de sensibilidade do suporte metodológico implementado para o lago Paranoá. Sabe-se que essas etapas são difíceis e trabalhosas no processo de construção de modelos, mas também indispensáveis à obtenção de ferramentas eficientes e realistas. Entretanto, como o suporte foi implementado em nível de protótipo e aplicado a situações hipotéticas, não se dispõem de informações suficientemente precisas para o ajuste das respostas do suporte ao comportamento real do sistema modelado e para a análise adequada da sensibilidade do modelo a variações nos parâmetros simulados.

### **7.5.2 - Consultas a especialistas, usuários e gestores**

Foram entrevistadas, ao todo, 12 pessoas. São várias as formações técnicas dos entrevistados: biólogo com especialização em ecologia e em modelagem qualitativa de sistemas, arquiteto com especialização em gestão ambiental urbana, biólogo com especialização em biomanipulação de ecossistemas aquáticos, engenheiro civil com experiência em planejamento de sistemas de saneamento, engenheiro eletricitista com especialização em economia e administração, engenheiro cartógrafo com especialização em gestão econômica ambiental, geógrafo com especialização em geologia e gestão ambiental, funcionários de empresa geradora de eletricidade. A relação das pessoas consultadas está em anexo.

Nessas consultas, o primeiro aspecto abordado diz respeito à validade das premissas identificadas durante o desenvolvimento da pesquisa, assim resumidas:

a) não-observância de conflitos graves entre os usos atuais da água, que faz com que seja de pouca utilidade o desenvolvimento de sistema de apoio à decisão em nível tático e operacional (por exemplo, quanto à definição de regras operativas ótimas do reservatório);

b) possibilidade de se fazerem outros usos da água do Lago, além dos atuais, e tendência de aumento das pressões antrópicas devido à ocupação de sua bacia de drenagem podem levar a situações de conflitos futuros entre os usos da água desse corpo d'água, fazendo com que seja pertinente a proposição de sistemas de apoio à decisão em nível estratégico.

A maioria dos entrevistados concordou com as premissas citadas. Contudo, registram-se opiniões discordantes no que se refere à não-observância de graves conflitos atuais entre os usos da água. Como exemplo, citou-se que as condições de balneabilidade pioram nas épocas chuvosas, evidenciando um conflito entre os usos da água para recreação e para diluição e depuração de águas de drenagem pluvial. Além disso, foram mencionados os lançamentos clandestinos de esgotos nas galerias de águas pluviais e as retiradas não autorizadas de água do Lago, que também interferem, em maior ou menor grau, com outros usos da água desse Lago. Outra questão levantada é que os usos atuais da água do Lago são afetados por problemas decorrentes da ocupação crescente da bacia de drenagem, indicando que há conflitos entre a gestão urbana e ambiental da bacia e os usos da água do Lago.

Vale ressaltar que, devido à opinião fortemente discordante, encerrou-se nesse ponto a consulta a um dos especialistas. Essa pessoa manifestou-se no sentido de que a abordagem ora proposta para o tratamento do problema “gestão dos múltiplos usos da água de reservatórios” é equivocada. No seu entendimento, como os usos da água são diretamente influenciados pela gestão territorial ambiental da bacia de drenagem, a abordagem deveria ter sido orientada para os problemas “de montante”, e não para os conflitos no “fim da linha”, ou seja, no Lago.

Deve-se dizer que as divergências expostas são pertinentes, mas considerá-las de forma adequada no suporte metodológico proposto constitui tarefa complexa. A consideração dos impactos da drenagem pluvial, em termos de contaminação por patogênicos, bem como de outros impactos aos usos da água do reservatório associados à ocupação urbana e à gestão ambiental da bacia, demanda grande esforço de levantamento de dados e de modelagem do problema. Ademais, não existem dados suficientes sobre os lançamentos clandestinos de efluentes no sistema de drenagem pluvial e as captações não autorizadas de água do Lago para fins consuntivos. Portanto, a contemplação desses aspectos se mostrou incompatível com os recursos disponíveis para o desenvolvimento da presente pesquisa, apresentando-se como possibilidades de aperfeiçoamentos futuros.

As entrevistas prosseguiram com a enumeração dos usos identificados como possíveis, atuais ou potenciais, conforme apresentado na Tabela 7.20. Solicitou-se, então, aos 11 entrevistados restantes, que opinassem sobre a pertinência desses usos e sobre a necessidade de se considerarem outros usos além dos citados. Também foi solicitado que cada entrevistado atribuísse graus de importância relativa para cada um dos usos julgados pertinentes.

Tabela 7.20 – Possíveis usos (diretos e indiretos) da água do lago Paranoá

<b>Usos da água do Lago</b>	<b>Usos da água do Lago e/ou de seus tributários</b>
recreação e paisagismo	abastecimento público
pesca profissional	diluição e depuração de águas servidas
produção de energia	irrigação agrícola
amortecimento de cheias	irrigação paisagística e outras formas de reúso não-potável (usos menos nobres)
navegação	

Não foram propostos outros usos possíveis, diretos ou indiretos, da água do Lago. Os pesos atribuídos aos usos são apresentados na Tabela 7.21.



Tabela 7.21 – Pesos atribuídos pelos entrevistados aos usos possíveis (diretos e indiretos) da água do lago Paranoá.

uso	pesos ( $\Sigma$ pesos = 10)									peso médio
	1,5	1	1	1,5	3	2,5	2	2	2	
recreação	1,5	1	1	1,5	3	2,5	2	2	2	1,8
paisagismo	1,5	1	1	1,5	0,5	2	3	3	3	1,8
pesca profissional	0,5	1	0,75	1	1,5	1	1	2	1	1,1
navegação comercial	0,5	2	0,25	0	0	0,5	1	0	0	0,5
produção de energia	1	1	1,5	1	1,5	0,5	1	2	3	1,4
irrigação agrícola	0,5	1	1	1	0	0	0	0	0	0,4
irrig. paisagística e outros menos nobres	1	0	1	1	1	0,5	1	0	0	0,6
abastecimento público	1,5	2	1,5	1,5	1,5	1	0	0	0	1,0
amortecimento de cheias	0,5	0	0,5	0,5	0	0	1	0	0	0,3
diluição e depuração de efluentes	1,5	1	1,5	1	1	2	0	1	1	1,1

Obs.: 2 dos 11 entrevistados optaram por atribuir pesos aos usos em conjunto com outros entrevistados.

Apesar de não se tratar de uma amostra representativa, os jogos de pesos permitem, de modo preliminar, indicar os usos considerados mais relevantes e aqueles julgados menos interessantes ou inviáveis. Nesse sentido, verifica-se que os usos atualmente praticados – recreação, paisagismo, produção de energia, pesca profissional e diluição e depuração de efluentes – foram considerados, na média, usos importantes. Isso reflete, de certa forma, a tendência que as pessoas têm de extrapolar a percepção do contexto atual em julgamentos para situações hipotéticas. Outro uso possível considerado importante foi o abastecimento público, devendo-se ressaltar que os diferentes jogos de pesos revelam conflitos potenciais entre essa utilização e a produção de energia. Já a navegação comercial, a irrigação agrícola, a irrigação paisagística e outros usos menos nobres e o amortecimento de cheias foram considerados, de modo geral, de importância secundária ou mesmo irrelevantes.

Na etapa final das entrevistas, foi apresentado a cada entrevistado o esquema da estrutura do suporte metodológico (Figura 7.3). Nesse ponto, foi feita explicação sucinta da metodologia proposta, seguida da apresentação de duas simulações preliminares, concebidas com o intuito de exemplificar, de modo verossímil, a aplicação da ferramenta desenvolvida. Cabe aqui esclarecer que as simulações apresentadas nas entrevistas diferem das simulações do item 7.4 – Aplicação do suporte metodológico ao caso do lago Paranoá porque essas foram construídas após a realização das entrevistas, inclusive tendo-se utilizado informações obtidas nessas ocasiões.

Os questionamentos finais foram quanto à aplicabilidade desse tipo de ferramenta para o auxílio à gestão estratégica e participativa de reservatórios de usos múltiplos, quanto à natureza das respostas fornecidas e quanto aos possíveis melhoramentos da metodologia proposta.

De modo geral, o suporte metodológico foi considerado útil como ferramenta de apoio à gestão estratégica de múltiplos usos da água de reservatórios. Como se trata de processo decisório complexo, considerou-se que é pertinente e válido o desenvolvimento de ferramentas que permitam levar em conta interesses conflitantes, incorporar aspectos técnicos, formalizar questões polêmicas e vislumbrar resultados de possíveis decisões, contribuindo, em última instância, para a capacitação dos envolvidos e para uma maior objetividade do processo decisório.

Ressalta-se que as opiniões dos entrevistados sobre a utilidade do suporte foram obtidas após explanação sucinta oral somente, não tendo sido disponibilizado a eles material para leitura prévia, o que pode ter limitado a análise. Entretanto, convém lembrar que o objetivo principal da pesquisa é a concepção de suporte metodológico para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos, e, nesse sentido, as aplicações desse suporte ao caso do lago Paranoá foram feitas mais a título de exemplo, devido ao caráter potencial de alguns usos e à conseqüente carência de dados mais confiáveis sobre a viabilidade e as necessidades associadas a esses usos. Desse modo, o objetivo das consultas alinha-se ao objetivo principal da pesquisa, ou seja, o de avaliar primordialmente a estrutura conceitual e o potencial de aplicação do suporte concebido e, com menos ênfase, a correção dos cenários simulados e das respostas fornecidas. Considera-se que esse objetivo não é limitado pela metodologia empregada nas entrevistas.

Quanto ao tipo de informações que devem ser fornecidas pelo usuário e à natureza das respostas da ferramenta, registram-se, a seguir, as sugestões de alguns entrevistados. Essas considerações são relevantes e seu atendimento se apresenta como possibilidades de melhoramentos futuros do suporte metodológico proposto nesta pesquisa.

Uma delas é de que a atribuição de valores numéricos para os limites das funções de satisfação, para os pesos entre usos e para os pesos entre os aspectos relativos à disponibilidade hídrica e à eutrofização da água (para cada uso), deve ser facilitada para

ampliar as possibilidades de utilização do suporte metodológico. Isso porque estão associadas à definição desses valores questões técnicas complexas, que podem não ser completamente compreendidas pelos usuários e, conseqüentemente, pode-se comprometer a utilização da ferramenta.

Considerou-se, também, que a definição de valores numéricos precisos pode não ser abordagem apropriada no caso das funções de satisfação. A principal razão disso são as muitas imprecisões inerentes aos modelos incorporados na ferramenta (balanço hídrico e modelo Cepis), além do fato de que nem todas as variáveis intervenientes nos processos são consideradas. Como conseqüência, pode ser difícil especificar o melhor e o pior valor para um determinado estado do sistema, sendo talvez mais adequada a definição de faixas de valores.

Por fim, outra sugestão foi de que o significado das diferenças entre os resultados obtidos para diferentes simulações deve ser perfeitamente compreensível por todos, permitindo, assim, comparações mais adequadas entre elas.

Uma possibilidade julgada promissora para a consideração das questões acima mencionadas seria a adoção da teoria dos números difusos para a representação das relações de causa e efeito entre os estados do sistema (nível d'água, vazão retirada e nível trófico) e os usos da água do reservatório. Essa mesma abordagem também poderia ser empregada para evidenciar o significado das diferenças entre respostas de simulações feitas.

Por meio da abordagem difusa, poderiam ser estabelecidas relações de correspondência (ou regras de inferência difusa), por exemplo, entre intervalos difusos de concentração de fósforo na água do reservatório e respectivas probabilidades de eutrofização com intervalos de magnitude dos impactos sobre a utilização dessa água para abastecimento público e recreação e dos eventuais benefícios para a pesca profissional. As próprias simulações poderiam ser realizadas adotando-se as regras da álgebra difusa, e os resultados fornecidos pela ferramenta também seriam expressos em termos difusos.

Convém lembrar que a lógica difusa permite associar números ou conjuntos difusos a expressões lingüísticas do tipo “muito ruim”, “ruim”, “aceitável”, “bom” e “muito bom”,

que são facilmente compreendidas pelas pessoas. A utilização dessa abordagem contribuiria, então, para a incorporação e a transmissão intuitiva das informações associadas aos aspectos técnicos do suporte metodológico, facilitando a utilização dessa ferramenta pelos usuários.

## 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Na presente pesquisa, foi proposta uma metodologia para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos, passível de ser utilizada no âmbito de Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs). Partiu-se do princípio de que uma ferramenta dessa natureza contribuiria para a discussão das questões pertinentes à gestão estratégica dos múltiplos usos da água de reservatórios, em um contexto descentralizado e participativo. Além disso, a adoção desse tipo de suporte metodológico como instrumento de apoio à discussão dos CBHs apresentaria a vantagem de promover a capacitação dos seus membros, na medida em que permitiria a percepção qualitativa dos aspectos técnicos associados a seus respectivos sistemas de valores e critérios de decisão.

Em termos sucintos, esse suporte metodológico consiste de um modelo de simulação do reservatório, em termos de quantidade de água (nível d'água, vazão defluente e tempo de residência hidráulica) e de qualidade da água (nível trófico), associado a um modelo multicritério para consideração dos múltiplos usos. Os estados resultantes do reservatório, obtidos para as condições de utilização simuladas, são confrontados com as metas de satisfação definidas para cada uso. Disso se derivam os graus de satisfação de cada um dos usos, os quais, ponderados por pesos indicativos da importância relativa entre eles, fornecem o grau de satisfação global proporcionado pela operação do reservatório conforme o cenário simulado. Esse grau de satisfação indicaria, indiretamente, o potencial de conflitos entre os usos da água do reservatório.

O lago Paranoá, no Distrito Federal, foi escolhido como caso de aplicação da metodologia proposta. No caso desse Lago, os usos atuais não configuram situação de conflitos graves, ocorrendo uma condição de equilíbrio na satisfação das diferentes demandas e funções. Avaliou-se, por isso, que não há necessidade de se desenvolver um sistema de apoio para decisões de curto prazo, como, por exemplo, a gestão tática e operacional do reservatório, envolvendo regras operativas e volumes-meta mensais.

Por outro lado, verificam-se a tendência de aumento e de diversificação da ocupação da bacia de drenagem do Lago e a possibilidade de se utilizar sua água para outros fins, além dos atuais, inclusive usos consuntivos, como abastecimento de água e outros menos

nobres. Nesse sentido, foi construído um protótipo baseado na metodologia proposta, para simular os impactos sobre o lago Paranoá resultantes de diferentes alternativas de retiradas de vazão ou de ocupação e exploração da sua bacia de drenagem. O objetivo da aplicação desse simulador é subsidiar decisões de planejamento relacionadas à gestão dos usos da água do lago Paranoá.

Para uma determinada política operativa do reservatório, esse simulador é sensível a retiradas de vazão para fins consuntivos, contínuas ou sazonais, tanto do Lago (braços e segmento central) como dos seus tributários principais, e a mudanças no cenário de aporte de fósforo ao Lago, devido à maior ocupação ou à diversificação das atividades na bacia de drenagem ou à modificação no nível de remoção de fósforo pelas ETEs, por exemplo.

Com vistas a facilitar o entendimento do processo de desenvolvimento do presente trabalho e dos resultados obtidos, este capítulo de conclusão foi estruturado em quatro partes. Na primeira parte, é avaliado o procedimento metodológico adotado. A segunda parte é dedicada às considerações a respeito dos objetivos da pesquisa, no que se refere à pertinência e à aplicabilidade desse tipo de instrumento à gestão de reservatórios de usos múltiplos. Na terceira parte, é avaliada a abordagem adotada para a concepção da ferramenta proposta, com sugestão de possíveis aperfeiçoamentos futuros. Por fim, são feitas considerações acerca dos estudos sobre o lago Paranoá e da aplicação dessa metodologia ao caso desse reservatório.

### *Metodologia utilizada*

A metodologia adotada para a realização do presente trabalho foi definida em função de sua natureza exploratória. Desse modo, a revisão bibliográfica foi voltada ao estudo de casos similares ao da problemática em questão. Buscou-se, com isso, promover uma reflexão crítica sobre as premissas identificadas e as metodologias que têm sido adotadas para o tratamento dos temas “gestão integrada e participativa de recursos hídricos com múltiplos usos” e “gestão de reservatórios”.

Também com esse espírito exploratório, foram feitos o levantamento e a análise de dados a respeito do lago Paranoá, tendo sido desenvolvidos estudos hidrológicos e da evolução da qualidade da água desse corpo d'água. Essas etapas do trabalho permitiram a concepção do

suporte metodológico para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos, no contexto da aplicação ao caso do lago Paranoá.

Devido à ausência de conflitos significativos entre os usos atuais, a aplicação do protótipo ao caso do lago Paranoá considerou situações simuladas para cenários futuros, o que determinou o alcance da etapa de avaliação dos resultados da pesquisa. Assim, foi feita análise de coerência dos resultados e foram realizadas consultas a especialistas e gestores, quanto à validade das premissas adotadas, à natureza das respostas fornecidas, à consistência dos resultados obtidos para as simulações e à potencialidade de aplicação da metodologia proposta a casos reais.

### *Objeto de pesquisa*

A gestão participativa dos recursos hídricos é um dos princípios da Lei Federal n.º 9.433/97. Esse paradigma de gestão aperfeiçoa o processo decisório, pois confere a ele maior transparência e credibilidade e permite a participação de todos os atores afetados, direta ou indiretamente, pelas decisões a serem tomadas. Também tende a conduzir à melhor solução (ou a mais satisfatória possível), na medida em que possibilita a negociação nas situações de conflito e a obtenção de soluções de compromisso. Ao favorecer uma maior conscientização sobre a natureza do problema para os diferentes envolvidos no processo decisório e, em última instância, para a sociedade como um todo, termina por facilitar a própria implementação e a fiscalização das decisões acordadas.

É importante destacar que a identificação dos aspectos relevantes, que devem ser considerados no processo de formulação do problema e de discussão e obtenção de soluções de consenso, envolve conhecimentos técnicos complexos. Os atores envolvidos nesse processo, contudo, possuem capacidades distintas de compreender os desdobramentos das alternativas possíveis de decisão. Por esse motivo, torna-se útil, e mesmo necessário, o emprego de mecanismos que sejam capazes de explicitar e traduzir tais questões técnicas, de captar dos atores suas preferências e de representar as diferentes prioridades entre os usos.

### *Abordagem empregada na ferramenta proposta*

Quanto à escolha da abordagem empregada na ferramenta proposta, observou-se que as técnicas tradicionais da Pesquisa Operacional se aplicam a problemas razoavelmente estruturados, em que os critérios são expressos de forma quantitativa. Essa característica limita em muito sua aplicação a problemas em que se devem levar em conta valores e critérios subjetivos e sujeitos a grandes incertezas, como pode ocorrer na gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos.

Já a abordagem por meio da simulação de sistemas, empregada na presente pesquisa, é bastante útil em estudos de planejamento e gestão de reservatórios, pois permite uma representação mais detalhada e específica dos sistemas. Uma importante vantagem dos processos de simulação é a possibilidade de consideração da variabilidade hidrológica por meio do uso de séries históricas representativas da bacia hidrográfica ou de séries sintéticas. No caso do lago Paranoá, foram utilizados dados hidrológicos de um período de 24 anos, que se mostraram representativos da variabilidade hidrológica da região.

Por outro lado, a simulação da operação de reservatórios apresenta a restrição de se definir previamente a política operativa a ser simulada. Considerou-se que tal limitação não foi relevante no caso da aplicação ao lago Paranoá, tendo sido adotada, nas simulações, a regra operativa atual, considerada satisfatória devido à contribuição para a manutenção da boa qualidade da água armazenada.

Quanto à metodologia multicritério utilizada, cabem algumas considerações.

Tendo em vista o caráter potencial de muitos dos usos possíveis da água do Lago e a premissa segundo a qual a gestão estratégica dos usos da água desse corpo d'água deve levar em conta essas potencialidades, concluiu-se que a fase atual da concepção de modelo de gestão de conflitos de usos da água do lago Paranoá é, primordialmente, a de identificação e formalização do problema e das possíveis decisões.

Devido à necessidade de estudos mais aprofundados sobre a viabilidade de cada uso potencial, não era objetivo desta pesquisa formular alternativas de decisão em bases que permitissem uma comparação efetiva dessas alternativas. Nesse caso, poderiam ter sido



empregados métodos multicritério de comparação e hierarquização de alternativas, como o Electre e a Programação de Compromisso. Assim, tendo em vista o objetivo de trazer subsídios à identificação das decisões possíveis quanto à gestão estratégica dos múltiplos usos da água do Lago, foi desenvolvido um modelo de simulação do reservatório, que permite simular diferentes cenários de utilização da água e os respectivos impactos sobre o balanço hídrico e a condição de eutrofização do corpo d'água. Esse modelo de simulação foi associado a um modelo multicritério simples, inspirado no trabalho de Tilmant *et al.* (2002a), que permite a atribuição de diferentes prioridades a esses usos.

Para a valoração dos múltiplos usos, foram adotadas funções de satisfação, que representam a satisfação proporcionada aos diversos usos pelos estados do sistema. No caso do lago Paranoá, esses estados são o volume armazenado e o respectivo nível d'água, as vazões retiradas e a concentração estimada de fósforo na água do reservatório. No presente trabalho, a definição das funções de satisfação do abastecimento e da irrigação agrícola foi feita, a exemplo do enfoque dado no trabalho de Tilmant *et al.* (2002a), a partir da especificação dos valores limites para cada uso, correspondentes à satisfação total (igual a 1) ou nula (igual a 0), entre os quais se interpola uma função sigmoïdal contínua e monotônica.

A hipótese implícita no emprego desse tipo de função é sua capacidade de representar adequadamente as condições de satisfação dos usos considerados, tanto no que se refere à ausência de descontinuidades no intervalo considerado, como à própria forma da curva. Um futuro aperfeiçoamento do suporte metodológico apresentado consistirá, então, da pesquisa sobre os tipos de funções mais apropriadas para representar os diferentes usos.

Além disso, a definição das funções de satisfação com números precisos se mostra, desde o início, inadequada, tendo-se em vista as muitas imprecisões inerentes a ferramentas dessa natureza e a impossibilidade de se diferenciarem, de fato, as conseqüências decorrentes de pequenas alterações nas variáveis consideradas (por exemplo, variações nas concentrações de fósforo na água do reservatório de 0,020 e de 0,025 mg/L). Por isso, indica-se, como outro futuro aperfeiçoamento deste trabalho, a adoção da teoria dos números difusos para a definição dos limites das funções de satisfação e para a manipulação algébrica dessas funções.

Um importante melhoramento do suporte metodológico consistirá na incorporação de mecanismos que permitam explicitar as questões técnicas associadas aos múltiplos usos da água, tanto no que se refere aos seus possíveis efeitos sobre o reservatório quanto à forma como os estados desse reservatório afetam esses usos. Isso facilitará a utilização da ferramenta por não especialistas, principalmente nas etapas de atribuição dos pesos e de definição dos limiares de satisfação dos usos. Esse aperfeiçoamento também viabiliza uma utilização mais precisa da ferramenta, menos sujeita a um julgamento eventualmente tendencioso dos usuários.

Outro aperfeiçoamento da ferramenta ora apresentada diz respeito à consideração de outros fatores de qualidade da água armazenada, que também afetam os usos que dela se podem fazer. Um exemplo é a contaminação por patogênicos, que compromete a utilização para atividades de contato primário e para fins de abastecimento. Outro exemplo é o aporte de sedimentos, que leva ao assoreamento acelerado e à conseqüente perda de área de espelho d'água e de volume armazenado no reservatório, com impactos na maioria dos usos e também no equilíbrio do ecossistema. Deverá ser avaliada a possibilidade de ser definido um índice de qualidade da água, de modo a refletir o efeito agregado de diversos fatores de qualidade da água sobre os diferentes usos da água.

Apresenta-se, também, como recomendação para trabalhos futuros, a concepção de modelo de geração de cargas poluentes da bacia de drenagem do reservatório, considerando, por exemplo, nutrientes, poluentes conservativos, organismos patogênicos e sedimentos. Esse modelo pode ser associado a um Sistema de Informações Geográficas, permitindo simular os efeitos de diferentes políticas de gestão territorial e ambiental da bacia com mais propriedade.

Por fim, registra-se que a implementação do simulador se deu em nível de protótipo, por meio de planilhas de cálculo Excel, e com algumas simplificações para sua aplicação ao caso do lago Paranoá. Entretanto, considera-se que a metodologia ora apresentada pode ser generalizada. Assim, outra recomendação para futuros trabalhos será a implementação do simulador em ambiente computacional mais apropriado e sem as simplificações ora adotadas, de modo a permitir sua utilização para casos genéricos e, eventualmente, sua incorporação a Sistemas de Apoio à Decisão de ampla utilização na área de sistemas hídricos, como o AquaNet (LabSid/USP, 2002). Outra possibilidade a ser avaliada é,

estando a metodologia apta a ser aplicada a casos genéricos, a da construção de um sistema especialista associado a ela, com vistas a incorporar na análise questões heurísticas que não foram consideradas nas simulações hidráulico-hidrológicas e do estado trófico das águas.

#### *O lago Paranoá como caso de aplicação*

O lago Paranoá foi escolhido para aplicação do protótipo baseado no suporte metodológico desenvolvido para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos, tendo em vista a possibilidade de ocorrência de conflitos futuros pelo uso de suas águas. Além disso, deve-se ressaltar que o lago Paranoá tem sido objeto de diversos estudos ao longo dos anos e conta com séries históricas de monitoramento hidrológico e de qualidade da água, que forneceram importantes subsídios para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Apesar de, atualmente, não se verificarem conflitos significativos pelo uso da água desse corpo d'água, foram realizados estudos hidrológicos e de qualidade da água que indicaram a possibilidade de utilização da água do Lago para outros fins, além dos atuais. Além disso, há tendência de intensificação das pressões antrópicas associadas à ocupação e à exploração de sua bacia de drenagem. Dessa forma, considera-se provável que, no futuro, observem-se conflitos mais importantes entre usos da água do lago Paranoá. Por isso, o suporte metodológico foi desenvolvido sob uma perspectiva de prevenção de conflitos, na medida em que permite antever o conflito potencial associado a um determinado cenário de usos da água do Lago.

Quanto aos estudos desenvolvidos sobre a hidrologia da bacia do lago Paranoá, ressalta-se uma certa imprecisão do balanço hídrico do reservatório, associada à primeira metade da série histórica de dados hidrológicos utilizada, principalmente. Por isso, recomenda-se o futuro aperfeiçoamento desse estudo de balanço hídrico por meio da pesquisa de metodologias adequadas para a estimativa das parcelas associadas à precipitação, tendo em vista que a maior imprecisão se verifica nos meses chuvosos. Outro aspecto que não foi considerado e que pode ser mais bem tratado futuramente diz respeito à variação, ao longo da série histórica de dados hidrológicos, de fatores que afetam o ciclo hidrológico, como o grau de impermeabilização do solo, o desmatamento e as mudanças climáticas regionais, por exemplo.

No que diz respeito à qualidade da água do Lago, ressalta-se a importância da contribuição difusa de poluentes, em termos de nutrientes, patogênicos e sedimentos. Por isso, recomendam-se, para futuros trabalhos, pesquisas que permitam melhores estimativas desses impactos e indiquem as melhores abordagens para o tratamento desse problema. Além disso, diante dos efeitos benéficos da alteração da regra operativa do reservatório sobre a qualidade da água armazenada, podem ser úteis estudos acerca dos mecanismos e da previsão dos efeitos associados a essa nova regra operativa.

Sugere-se, também, que sejam desenvolvidos estudos mais detalhados sobre a viabilidade dos usos identificados como potenciais. Esses estudos permitirão uma comparação mais apropriada das possíveis alternativas de gestão dos usos da água do Lago e certamente contribuirão para a tomada de decisão quanto aos usos que convém fazer da água do Lago.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, L.G.T., Porto, R.L.L. e Zahed Filho, K. (1997). “Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo.” In: Porto *et al.* (eds). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 165-227.
- Barros, M.T.L. (1997). “A Programação Dinâmica Aplicada à Engenharia de Recursos Hídricos.” In: Porto *et al.* (eds). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 239-277.
- Baltar, A.M. (2001). *Sistema de Apoio à Decisão para Avaliação Econômica da Alocação de Recursos Hídricos: Aplicação à Bacia da Barragem do Rio Descoberto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 117p.
- Barbosa, P.S.F. (1997a). “Modelos de programação linear em recursos hídricos.” In: Porto *et al.* (eds). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 97-163.
- Barbosa, P.S.F. (1997b). “O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros”. *A Água em Revista*, **8**(2), 42-46.
- Barcellos, L.O. (2003). *Definição de Regras Operativas de Reservatórios com Usos Múltiplos: O Caso da Barragem do Bico da Pedra*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 168p.
- Barth, F.T. (1987). “Fundamentos para Gestão de Recursos Hídricos.” In: Barth, F.T. *et al.* *Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Nobel/ABRH, São Paulo, Brasil, 1-91.
- Björk, S. (1979). *The Lago Paranoá Restoration Project*. Relatório Final para a Caesb, Brasília, Brasil, 45p.
- Braga, B. e Gobetti, L. (1997). “Análise Multiobjetivo.” In: Porto *et al.* (eds). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 97-163.
- Branco, S.M. e Rocha, A.A. (1977). “Poluição, proteção e usos múltiplos de represas.” Editora Edgard Blücher/Cetesb, São Paulo, 185p.

- Brasil (1986). *Resolução Conama nº.20, de 18 de junho de 1986*. Conselho Nacional de Meio Ambiente, Brasília, Brasil.
- Brasil (1997). *Lei Federal n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997*. Brasília, Brasil.
- Burnett, J.A.B., Mattos, S.P. e Azzolin, N.M.P. (2001). “Intervenções da Companhia de Saneamento.” In: Fonseca, F.O. (ed). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Semarh, Brasília, Brasil, 199-211.
- Cai, X., McKinney, D.C. e Lasdon, L.S. (2001). “Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach”. *Advances in Water Resources*, **24**, 667-676.
- Castagnino, W.A. (1982). *Investigacion de Modelos Simplificados de Eutrofizacion en Lagos Tropicales*. Versão revisada, Organização Panamericanda da Saúde – OPAS, Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ciências do Ambiente – Cepis, 27p.
- Chang, N.B., Wen, C.G. e Chen, Y.L. (1997). “A fuzzy multi-objective programming approach for optimal management of the reservoir watershed”. *European Journal of Operational Research*, **99**, 289-302.
- Chatterjee, B., Howitt, R.E. e Sexton, R.J. (1998). “The optimal joint provision of water for irrigation and hydropower”. *Journal of Environmental Economics and Management*, **36**, 295-313.
- Chiavenato, I. (1994). *Administração: Teoria, Processo e Prática*. 2ª edição, Editora Makron, São Paulo, Brasil, 463 p.
- Cirilo, J.A. (1997). “Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos.” In: Porto *et al.* (eds). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 305-359.
- Cohon, J.L. e Marks, D.H. (1975). “A review and evaluation of multiobjective programming techniques”. *Water Resources Research*. **11**(2).
- Concremat Engenharia e Tecnologia S.A. (2001). *Projeto Executivo das ETAs do Taquari, Taquara e Gama. Estudo de Concepção*, Caesb, Brasília, Brasil, 115p.
- Concremat Engenharia e Tecnologia S.A.(2003). *Plano de Gestão e Preservação do Lago Paranoá. Relatório Final*, Caesb, Brasília, Brasil, 190p.
- Cosgrove, W.J. (2002). “Towards Sustainable Use of Natural Resources”. In: World Water Council. *New World Water - 2002*, 11-14.
- Dandy, G. e Crawley, P. (1992). “Optimum operation of a multiple reservoir system including salinity effects”. *Water Resources Research*, **28**(4), 979-990.

- Ensslin, L., Montibeller Neto, G. e Noronha, S.M. (2001). *Apoio à Decisão – Metodologia para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas*. Editora Insular, Florianópolis, Brasil, 296 p.
- Ferrante, J.E.T., Rancan, L. e Netto, P.B. (2001). “Meio Físico.” In: Fonseca, F.O. (ed). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH, Brasília, Brasil, 45-79.
- Fontane, D.G., Labadie, J.W. e Loftis, B. (1981). “Optimal control of reservoir discharge quality through selective withdrawal”. *Water Resources Research*, **17**(6), 1594-1604.
- Fontane, D.G., Gates, T.G. e Moncada, E. (1997). “Planning reservoir operations with imprecise objectives”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **123**(3), 154-162.
- Flug, M., Seitz, H.L.H. e Scott, J.F. (2000). “Multicriteria decision analysis applied to Glen Canyon Dam”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **126**(5), 270-276.
- Generino, R.C.M. e Cordeiro Netto, O.M. (1999). “Estações de Tratamento de Esgotos: um Exemplo de Aplicação”. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro.
- Georgakakos, A.P. (1993). “Operational tradeoffs in reservoir control”. *Water Resources Research*, **29**(11), 3801-3819.
- Georgakakos, A.P. (1993). “Operational tradeoffs in reservoir control”. *Water Resources Research*, **29**(11), 3801-3819.
- Gobbetti, L.E.C., Ceballos, L.E.C., Fernandes, R.J.A.R. e Porto, R.L.L. (1997). “Obtenção de políticas ótimas para a operação do reservatório do Guarapiranga usando programação dinâmica estocástica”. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos da ABRH*, Vol.2, Vitória, Brasil.
- Goicoechea, A., Hansen, D.R. e Duckstein, L. (1982). *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*. John Wiley & Sons, Inc. EUA.
- Gomide, L. (1987). Extratificação térmica – Reflexos na hidrodinâmica dos reservatórios e na qualidade de água. Correntes de densidade. Captação Seletiva. Palestra.
- Gough, J.D. e Ward, J.C. (1996). “Environmental decision-making and lake management”. *Journal of Environmental Management*, **48**, 1-15.
- Hämäläinen, R.P., Kettunen, E., Ehtamo, H. e Marttunen, M. (2001). “Evaluating a framework for multi-stakeholder decision support in water resources management”. *Group Decision and Negotiation*, **10**, 331-353.

- Harboe, R. (1992). "Multiobjective decision-making techniques for reservoir operation". *Water Resources Bulletin*, **28**(1), 103-110.
- Hayes, D.F., Labadie, J.W., Sanders, T.G. e Brown, J.K. (1998). "Enhancing water quality in hydropower systems operations". *Water Resources Research*, **34**(3), 471-483.
- Hespanhol, I. (2001). "Potencial de reuso de água no Brasil – agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos". *III Encuentro de las Aguas*, Anais eletrônicos ([http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/tema\\_verde.htm](http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/tema_verde.htm)), Santiago, Chile.
- Hidrogeo Consultoria e Projetos (1990). "*Estudo de Impacto Ambiental do Setor Habitacional Taquari*". Volume 1. Brasília, Brasil, 338p.
- Hiez, G.L.G. e Rancan, L. (1983). "Aplicação do Método do Vetor Regional no Brasil". *Anais do V Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Vol.2, Brasil.
- Hora, A.F., Hora, M.A.G.M. e Silva, R.C.V. (2004). "Comparação da produção energética na UHE-Manso para cenários distintos de vazões regularizadas". *Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste*, Goiânia, Brasil.
- ISDF, UnB, Caesb e Reserva Ecológica do IBGE (1996). *Avaliação da Qualidade Sanitária do Pescado do Lago Paranoá*. Relatório Final do Projeto de Pesquisa, apresentado à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), Brasília, 122p.
- Johnson, S.A., Stedinger, J.R. e Staschus, K. (1991). "Heuristic operating policies for reservoir system simulation". *Water Resources Research*, **27**(5), 673-685.
- Koutosoyannis, D., Efstratiadis, A. e Karavokiros, G. (2002). "A decision support tool for the management of multi-reservoir systems". *Journal of the American Water Resources Association*, **38**(4), 945-958.
- Laabs, H. e Schultz, G.A. (1992). "Reservoir management rules derived with the aid of multiple objective decision-making techniques". *Water Resources Bulletin*, **28**(1), 211-222.
- LabSid/USP – Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisões da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2002). *AcquaNet – Manual do Usuário*, disponível no endereço eletrônico <http://www.phd.poli.usp.br/labsid>, 25p.
- Lanna, A.E. (1997). "Introdução." In: Porto *et al.* (eds). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 15-41.



- Lebourges-Dhaussy, A.L., Dhaussy, P., e Lazzaro, X. (1998). “Avaliação do Estoque Pesqueiro por Ecossondagem.” In: *Serviço de Levantamento Hidroacústico (Ecossondagem) no Lago Paranoá/DF*. Fundação Sustentabilidade e Desenvolvimento, Brasília, Brasil, 50-72.
- Li, L. e Lai, K.K. (2001). “Fuzzy dynamic programming approach to hybrid multiobjective multistage decision-making problems”. *Fuzzy Sets and Systems*, **117**, 13-25.
- Liang, Q, Johnson, L.E. e Yu, Y-S. (1996). “A comparison of two methods for multiobjective optimization for reservoir operation”. *Water Resources Bulletin*, **32**(2), 333-340.
- MacCrimmon, K.R. (1973). “An overview of multiple objective decision making”. In: Cochrane, J.L. e Zeleny, M. (eds.). *Multiple Criteria Decision Making*. Univerity of South Carolina Press, Columbia, South Carolina, EUA, 18-44.
- Magna Engenharia (2000a). *Plano Diretor de Água e Esgotos do Distrito Federal. Volume 2, Tomo 1*, Porto Alegre, Brasil, 66p.
- Magna Engenharia (2000b). *Plano Diretor de Água e Esgotos do Distrito Federal. Volume 2, Tomo 2*, Porto Alegre, Brasil, 140p.
- Menezes Júnior, A., Sinoti, M.L. e Saraiva, R.C.F. (2001). “Histórico.” In: Fonseca, F.O. (ed). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Semarh, Brasília, Brasil, 25-43.
- Michalland, B., Parent, E. e Duckstein, L. (1997). “Bi-objective dynamic programming for trading off hydropower and irrigation”. *Applied Mathematics and Computation*, **88**, 53-76.
- Nandalal, K.D.W. e Bogardi, J.J. (1995). “Optimal operation of a reservoir for quality control using inflows and outflows”. *Water Science Technology*, **31**(8), 273-280.
- NCA Engenharia, Arquitetura e Meio Ambiente Ltda. (1997). “*Estudo de Impacto Ambiental para o Setor Habitacional Jardim Botânico*”. Volume 1, Brasília, Brasil, 276p.
- NCA Engenharia, Arquitetura e Meio Ambiente Ltda. (2003). “*Estudo de Pré-Viabilidade Técnica e Ambiental para o Aproveitamento do Ribeirão do Bananal*”. Brasília, Brasil, 100p.
- Netto, P.B. (2001). “Sustentabilidade Ameaçada.” In: Fonseca, F.O. (ed). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Semarh, Brasília, Brasil, 167-189.

- Oliva, A.Q., Cavalcante, C.V., Fonseca, F.O., Netto, P.B. e Ogliari, T.C. (2001). “Uso e Ocupação do Solo.” In: Fonseca, F.O. (ed). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Semarh, Brasília, Brasil, 213-227.
- Oliveira, R. e Loucks, D.P. (1997). “Operating rules for multireservoir systems”. *Water Resources Research*, **33**(4), 839-852.
- Opricovic, S. e Djordjevic, B. (1976). “Optimal long-term control of a multipurpose reservoir with indirect users”. *Water Resources Research*, **12**(6), 1286-1290.
- Owen, W.J., Gates, T.K. e Flug, M. (1997). “Variability in perceived satisfaction of reservoir management objectives”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **123**(3), 147-153.
- Özelkan, E.C., Galambosi, A., Fernández-Gaucherand, E. e Duckstein, L. (1997). “Linear quadratic dynamic programming for water reservoir management”. *Applied Mathematics Modelling*, **21**, 591-598.
- Pereira, C.E.B. (2004). *A capacidade de suporte do lago Paranoá avaliada pela dinâmica do fósforo, frente à ocupação de sua bacia de drenagem*. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Brasília, Programa de Pós-graduação *strictu sensu* em Planejamento e Gestão Ambiental, Brasília, DF, 150 p.
- Pidd, M. (1996). *Tools for Thinking: Modelling in Management Science*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, Inglaterra, 350 p.
- Porto, R.L.L.P e Azevedo, L.G.T (1997). “Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos.” In: Porto *et al.* (eds). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 43-95.
- Panigrahi, D.P. e Mujumdar, P.P. (2000). “Reservoir operation modelling with fuzzy logic”. *Water Resources Management*, **14**(2), 89-109.
- Rao, Z., Moore, I.N., O’Connell, P.E. e Jamieson, D.G. (2001). “An interactive management system for operational control of Kirazdere reservoir (Turkey)”. *Water Resources Management*, **15**(4), 223-234.
- Roy, B. (1993). “Decision science or decision-aid science ?”. *European Journal of Operational Research*, **66**, 184-203.
- Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, 320 p.

- Russel, S.O. e Campbell, P.E. (1996). “Reservoir operating rules with fuzzy logic programming”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **122**(3), 165-170.
- Saaty, T.L. (1990). “How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process”. *European Journal of Operational Research*, **48**, 9-26.
- Salas, H.J. (1983). Resumo do Segundo Encontro do Projeto Regional “*Desenvolvimento de Metodologias Simplificadas para a Avaliação de Eutrofização em Lagos Quentes*”, coordenado pelo Cepis. Brasília, Brasil, 33p.
- Salas, H.J. e Martino, P. (1990). *Metodologias Simplificadas para la Evaluacion de Eutrofizacion em Lagos Calidos Tropicales*. Programa Regional Cepis/HPE/OPS, 1981-1990, 84p.
- Semarh (2001). “Bacia do Lago Paranoá - Carta de Unidades Hidrográficas.” In: Fonseca, F.O. (ed). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Semarh, Brasília, Brasil, p.50.
- Shrestha, B.P., Duckstein, L. e Stakhiv, E.Z. (1996). “Fuzzy rule-based modeling of reservoir operation”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **122**(4), 262-269.
- Soncini-Sessa, R., Zuleta, J. e Piccardi, C. (1990). “Remarks on the application of a risk-averse approach to the management of ‘El Carrizal’ reservoir”. *Advances in Water Resources*, **13**(2), 76-84.
- Soncini-Sessa, R., Castelletti, A. e Weber, E. (2003). “A DSS for planning and managing water reservoir systems”. *Environmental Modelling & Software*, **18**, 395-404.
- Souto Maior, G., Chiarini, H., Netto, P.B. e Moretti, W. (2001). “Geração de Energia Elétrica.” In: Fonseca, F.O. (ed). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Semarh, Brasília, Brasil, 191-197.
- Souza Filho, F.A. e Gouveia, S.X. (2003). “Sistemas de Suporte às Decisões.” In: Campos, N. e Studart, T. (eds). *Gestão de Águas: Princípios e Práticas*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 91-112.
- Stam, A., Salewicz, K.A. e Aronson, J.E. (1998). “An interactive reservoir management system for Lake Kariba”. *European Journal of Operational Research*, **107**(1), 119-136.
- Starling, F.L.R.M. (2001). Avaliação da Eficiência da Pesca Ecológica do Programa de Biomanipulação e a sua Importância para o Processo de Despoluição do Lago Paranoá. Relatório Técnico, Caesb, Brasília, Brasil, 17p.

- Stedinger, J.R., Sule, B.F. e Loucks, D.P. (1984). “Stochastic Dynamic Programming models for reservoir operation optimization”. *Water Resources Research*, **20**(11), 1499-1505.
- TC/BR – Tecnologia e Consultoria Brasileira S.A. (1997). “*Estudo de Impacto Ambiental para o Setor Habitacional Dom Bosco*”. Volume 1, Brasília, Brasil, 288p.
- Tejada-Guibert, J.A., Johnson, S.A. e Stedinger, J.R. (1993). “Comparison of two approaches for implementing multireservoir operating policies derived using Stochastic Dynamic Programming”. *Water Resources Research*, **29**(12), 3969-3980.
- Tilmant, A., Faouzi, E.H. e Vanclooster, M. (2002a). “Optimal operation of multipurpose reservoirs using flexible stochastic dynamic programming”. *Applied Soft Computing*, **2**, 61-74.
- Tilmant, A., Fortemps, P. e Vanclooster, M. (2002b). “Effect of averaging operators in fuzzy optimization of reservoir operation”. *Water Resources Management*, **16**(1), 1-22.
- Tundisi, J.G. (2001). “*Planejamento e gerenciamento de lagos e reservatórios: uma abordagem integrada ao problema da eutrofização.*” Série de Publicações Técnicas (11P) da UNEP-IETC. 385 p.
- van Rooy, P.T.J.C., de Jong, J., Jagtman, E., Hosper, S.H. e Borres, P.C.M. (1998). “Comprehensive approaches to water management”. *Water Science and Technology*, **37**, 201-208.
- Vianna, R.F.M. (2001). “Eutrofização: Métodos Corretivos Internos.” In: Fonseca, F.O. (ed). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Semarh, Brasília, Brasil, 343-353.
- Vincke, P., Gassner, M. e Roy, B. (1992). *Multicriteria Decision-Aid*. John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra, 154p.
- von Sperling, E. (1993). “A abordagem limnológica no gerenciamento de lagos e reservatórios”. *Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Vol.4, 373-380, Gramado/RS, Brasil.
- von Sperling, E. (1994). “Avaliação do estado trófico de lagos e reservatórios tropicais”. *Revista BIO – Associação de Engenharia Sanitária e Ambiental*, **3**(3), 68-76.
- von Sperling, M. (1996). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 243 p.

- Yeh, W.W-G. e Becker, L. (1982). "Multiobjective analysis of multireservoir operations".  
*Water Resources Research*, **18**(5), 1326-1336.
- Yeh, W.W-G (1985). "Reservoir management and operation models: a state-of-art review."  
*Water Resources Research*, **21**(12), 1797-1818.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE A**

**SÉRIES HIDROLÓGICAS DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS,  
PLUVIOMÉTRICOS E EVAPORIMÉTRICO CONSIDERADOS NOS  
ESTUDOS HIDROLÓGICOS**

**SÉRIES DE VAZÕES EFLUENTES DAS  
ETES BRASÍLIA NORTE E BRASÍLIA SUL**

Tabela A.1 – Vazões médias mensais, em m<sup>3</sup>/s, do riacho Fundo (posto fluviométrico: Montante Zoológico - 60478200), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 51' 32" S						Longitude: 47° 56' 56" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	10,30	7,38	6,61	4,85	2,96	2,33	1,91	1,73	1,69	1,62	2,75	3,69
1980	9,05	12,50	6,95	5,79	4,47	3,42	2,89	2,51	2,55	2,09	3,04	5,21
1981	4,69	3,94	6,65	4,64	3,59	3,20	2,91	2,27	1,87	5,67	8,25	5,32
1982	8,92	5,08	7,32	5,47	4,01	3,00	2,39	1,99	2,14	4,30	5,50	4,48
1983	7,55	9,41	9,08	6,55	4,60	3,67	3,04	2,43	2,63	3,24	5,31	5,94
1984	5,09	4,44	4,26	5,09	3,01	2,46	1,98	1,96	2,20	3,30	2,32	3,32
1985	5,97	4,11	4,19	3,54	2,77	2,11	1,81	1,52	1,67	3,52	3,26	2,69
1986	6,92	4,82	3,91	2,51	2,03	1,73	1,58	1,54	1,30	1,89	1,82	2,44
1987	2,64	2,72	4,39	5,04	3,93	2,18	1,68	1,28	1,16	1,40	3,95	5,26
1988	3,75	4,63	6,53	5,19	2,98	2,43	1,95	1,63	1,35	2,49	3,37	4,90
1989	4,79	4,77	3,86	2,74	2,12	1,98	1,75	1,71	1,81	2,57	5,07	10,40
1990	6,22	5,95	4,29	3,48	3,30	2,12	2,39	1,74	1,96	3,19	3,35	3,31
1991	4,91	6,62	8,65	6,54	3,67	2,81	2,33	1,86	1,77	3,12	5,20	7,87
1992	9,05	9,29	6,02	7,69	4,85	3,49	2,87	2,53	2,51	4,89	7,63	8,95
1993	5,48	7,57	4,90	5,32	3,54	2,83	2,18	1,99	1,86	2,21	2,55	6,32
1994*	7,67	4,92	9,28	6,07	3,84	3,05	3,01	2,57	2,36	2,21	3,65	5,29
1995*	5,51	7,13	7,46	6,86	4,64	3,40	2,86	2,45	2,18	2,21	3,42	3,80
1996*	3,28	2,87	5,37	3,02	2,67	2,19	1,97	1,88	1,90	2,20	3,02	3,53
1997*	6,99	4,40	7,28	6,55	4,99	3,45	2,67	2,19	2,30	1,93	2,72	2,88
1998*	3,78	7,57	6,60	4,35	2,98	2,45	2,00	1,70	1,53	1,93	3,82	4,65
1999*	3,32	2,81	4,24	2,68	2,08	1,78	1,58	1,46	1,60	1,86	3,58	4,94
2000*	6,23	5,74	6,46	5,81	3,30	2,57	2,16	1,98	2,35	1,88	4,99	5,70
2001*	5,56	3,86	6,36	4,74	3,11	2,36	2,06	1,81	1,70	2,97	2,88	3,53
2002*	4,64	5,42	4,94	4,22	2,62	2,18	1,90	1,62	1,94	1,46	2,85	2,71

\* os dados a partir de julho de 1994 foram estimados por correlação com os dados do posto fluviométrico Gama Base Aérea.



Tabela A.2 – Vazões médias mensais, em m<sup>3</sup>/s, do ribeirão do Gama (posto fluviométrico: Base Aérea - 60478500), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 52' 18" S						Longitude: 47° 53' 46" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	9,47	8,54	6,42	5,21	2,09	1,83	1,36	1,12	1,49	1,18	1,40	2,11
1980	4,70	5,63	3,37	3,05	2,00	1,54	1,12	0,94	0,87	0,72	1,15	2,98
1981	2,84	1,80	3,57	2,38	1,60	1,29	0,98	0,78	0,61	1,92	5,33	3,54
1982	5,65	3,14	5,48	3,53	2,82	1,84	1,43	1,23	1,08	1,95	2,73	2,09
1983	6,05	7,20	6,38	4,46	2,70	2,04	1,70	1,29	1,14	1,57	3,31	4,65
1984	3,12	2,44	2,21	3,96	1,85	1,42	1,21	1,13	1,24	1,27	1,12	1,62
1985	3,12	2,74	3,16	2,64	1,86	1,39	1,19	0,94	0,86	1,38	1,65	3,00
1986	3,62	2,19	2,25	1,45	1,13	0,88	0,84	0,81	0,63	0,75	0,69	1,20
1987	1,10	1,38	2,55	2,93	1,90	1,19	0,90	0,74	0,71	0,73	2,04	4,24
1988	2,39	2,76	4,65	3,61	2,02	1,82	1,49	1,16	0,95	1,67	2,18	3,94
1989	3,20	3,31	2,84	1,66	1,20	1,15	0,93	0,90	0,83	1,00	3,07	5,27
1990	4,43	3,33	2,61	2,03	1,82	1,23	1,28	0,93	1,23	1,42	2,99	1,96
1991	2,44	3,22	5,18	3,75	1,85	1,20	0,90	0,77	0,69	0,97	2,44	3,87
1992	4,42	6,93	3,36	3,26	2,11	1,54	1,23	1,07	1,16	1,66	3,76	4,50
1993	3,29	5,70	3,31	3,08	2,07	1,78	1,38	1,27	1,14	1,12	1,09	3,27
1994	5,05	3,11	6,81	4,36	2,51	1,97	1,60	1,25	1,08	0,96	2,11	3,42
1995	3,60	4,89	5,16	4,68	2,90	1,91	1,48	1,15	0,94	0,96	1,93	2,23
1996	1,82	1,49	3,49	1,61	1,33	0,95	0,77	0,70	0,71	0,95	1,61	2,02
1997	4,78	2,71	5,01	4,43	3,18	1,95	1,33	0,94	1,03	0,74	1,37	1,50
1998	2,22	5,24	4,47	2,67	1,58	1,15	0,80	0,55	0,42	0,74	2,25	2,91
1999	1,85	1,44	2,58	1,34	0,86	0,62	0,46	0,36	0,47	0,69	2,06	3,14
2000	4,17	3,78	4,36	3,84	1,83	1,25	0,92	0,78	1,07	0,70	3,18	3,75
2001	3,64	2,28	4,28	2,98	1,68	1,08	0,84	0,64	0,56	1,57	1,50	2,02
2002	2,90	3,53	3,14	2,57	1,29	0,94	0,71	0,49	0,75	0,36	1,47	1,36

Tabela A.3 – Vazões médias mensais, em m<sup>3</sup>/s, do córrego Cabeça de Veado (posto fluviométrico: Dom Bosco - 60478600), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 51' 24" S						Longitude: 47° 51' 27" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>1979</b>	2,060	1,340	1,160	0,837	0,340	0,263	0,242	0,271	0,291	0,284	0,350	0,442
<b>1980</b>	0,933	1,530	0,613	0,628	0,481	0,414	0,351	0,252	0,232	0,258	0,464	0,585
<b>1981</b>	0,715	0,579	0,807	0,560	0,345	0,280	0,247	0,192	0,157	0,352	0,882	0,595
<b>1982</b>	1,020	0,505	0,755	0,498	0,360	0,246	0,197	0,190	0,210	0,322	0,321	0,303
<b>1983</b>	0,887	1,510	1,590	0,637	0,465	0,340	0,291	0,220	0,223	0,401	0,360	0,737
<b>1984</b>	0,497	0,450	0,484	0,446	0,155	0,127	0,114	0,128	0,188	0,196	0,174	0,249
<b>1985</b>	0,410	0,265	0,433	0,307	0,168	0,111	0,077	0,051	0,063	0,106	0,195	0,360
<b>1986</b>	0,658	0,352	0,260	0,177	0,145	0,106	0,121	0,145	0,085	0,323	1,580	2,400
<b>1987</b>	2,450	1,220	0,890	0,692	0,263	0,170	0,139	0,041	0,053	0,064	0,230	0,697
<b>1988</b>	0,357	0,461	1,040	0,738	0,321	0,300	0,279	0,179	0,089	0,264	0,254	0,414
<b>1989</b>	0,220	0,259	0,230	0,126	0,059	0,129	0,279	0,349	0,475	0,542	0,746	1,920
<b>1990</b>	1,110	0,747	0,772	0,836	0,544	0,385	0,434	0,498	0,455	0,315	0,688	0,451
<b>1991</b>	0,635	0,601	0,900	0,804	0,475	0,331	0,290	0,248	0,224	0,225	0,550	0,733
<b>1992</b>	0,890	1,030	0,605	0,718	0,425	0,306	0,313	0,297	0,324	0,379	0,547	0,921
<b>1993</b>	0,534	0,752	0,380	0,327	0,238	0,238	0,187	0,251	0,245	0,257	0,240	0,547
<b>1994</b>	0,724	0,444	0,719	0,639	0,292	0,251	0,206	0,153	0,184	0,203	0,292	0,375
<b>1995</b>	0,475	0,441	0,319	0,217	0,187	0,186	0,132	0,100	0,092	0,116	0,213	0,350
<b>1996</b>	0,232	0,193	0,662	0,221	0,129	0,103	0,072	0,078	0,080	0,080	0,137	0,212
<b>1997</b>	0,826	0,470	1,020	0,737	0,505	0,378	0,272	0,184	0,215	0,153	0,239	0,461
<b>1998</b>	0,478	0,618	0,710	0,385	0,242	0,173	0,114	0,090	0,063	0,155	0,322	0,372
<b>1999</b>	0,186	0,147	0,419	0,208	0,129	0,094	0,067	0,053	0,106	0,176	0,463	0,521
<b>2000</b>	0,338	0,317	0,614	0,465	0,223	0,142	0,097	0,088	0,150	0,135	0,456	0,442
<b>2001</b>	0,321	0,212	0,307	0,240	0,149	0,111	0,085	0,079	0,100	0,153	0,224	0,291
<b>2002</b>	0,513	0,656	0,351	0,329	0,162	0,154	0,130	0,071	0,148	0,067	0,254	0,366

Tabela A.4 – Vazões médias mensais, em m<sup>3</sup>/s, do ribeirão Torto (posto fluviométrico: montante Paranoá - 60477400), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 42' 51" S						Longitude: 47° 52' 39" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	12,80	12,60	7,69	5,62	2,02	1,16	0,80	0,56	0,51	0,66	1,12	1,62
1980	10,40	14,50	5,32	6,58	3,36	1,51	1,08	1,02	0,78	0,58	1,20	3,91
1981	3,13	1,66	3,67	3,13	1,54	1,30	1,01	0,77	1,16	3,73	7,09	5,12
1982	9,79	5,98	9,39	7,88	4,26	2,72	1,51	1,13	1,05	2,45	2,48	2,56
1983	7,28	12,50	6,46	5,32	2,93	1,85	1,43	1,14	1,64	2,86	5,11	6,30
1984	4,86	4,54	5,94	8,05	3,38	2,16	1,44	1,49	1,77	2,61	1,87	2,10
1985	5,22	3,85	4,57	4,48	2,59	1,47	1,26	1,07	0,93	2,00	2,07	3,86
1986	4,78	3,07	2,52	1,34	0,46	0,32	0,31	0,32	0,28	0,45	0,50	0,53
1987	0,85	0,80	3,26	1,59	0,68	0,25	0,20	0,17	0,17	0,18	0,99	4,36
1988	1,24	2,57	5,22	4,53	1,07	0,50	0,33	0,24	0,20	0,85	1,49	3,35
1989	2,68	3,31	3,36	1,75	0,99	0,68	0,50	0,76	1,19	1,61	3,17	20,30
1990	12,30	7,46	4,80	4,60	2,75	1,28	1,71	0,74	1,15	1,05	1,75	1,56
1991	3,45	3,48	8,08	5,57	2,22	0,90	0,59	0,27	0,28	0,56	2,86	2,52
1992	4,46	13,80	4,60	5,27	3,39	1,27	0,67	0,63	0,65	2,17	4,52	12,40
1993	6,50	6,92	4,82	3,95	1,74	0,92	0,66	0,65	0,78	0,55	0,65	3,18
1994	5,80	5,18	10,40	4,35	2,14	1,12	0,64	0,40	0,37	0,41	1,44	2,63
1995	3,22	2,94	2,45	2,92	1,62	0,62	0,48	0,44	0,40	0,56	0,88	2,42
1996	1,28	0,46	1,56	0,86	0,40	0,23	0,24	0,29	0,19	0,27	1,02	1,19
1997	3,90	1,33	3,48	3,10	2,69	1,74	0,80	0,43	0,39	0,29	0,64	0,96
1998	2,85	2,31	3,27	2,13	0,90	0,61	0,48	0,30	0,21	0,43	1,70	3,12
1999	1,47	0,61	1,94	1,19	0,53	0,38	0,41	0,36	0,27	1,01	1,79	2,86
2000	3,10	3,66	4,11	2,44	1,33	0,60	0,28	0,18	0,47	0,49	2,27	1,75
2001	2,39	2,17	4,09	2,92	1,18	0,69	0,32	0,31	0,33	0,87	1,83	4,09
2002	6,50	5,97	3,32	2,50	1,54	1,21	0,84	0,89	0,91	0,54	1,00	1,53

Tabela A.5 – Vazões médias mensais, em m<sup>3</sup>/s, do ribeirão Bananal (posto fluviométrico: EPIA-003 - 60477600), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 43' 41" S						Longitude: 47° 54' 36" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>1979</b>	4,83	3,80	4,32	3,48	2,69	2,28	2,03	1,75	1,82	1,76	2,27	3,04
<b>1980</b>	4,43	5,94	3,77	3,72	2,95	2,42	2,13	1,93	1,92	1,68	2,52	3,34
<b>1981*</b>	3,38	2,10	3,06	2,39	1,93	1,78	1,53	1,38	1,22	2,15	3,88	3,27
<b>1982</b>	4,71	3,38	4,15	4,15	2,96	2,26	1,99	1,88	1,78	2,29	2,04	2,23
<b>1983</b>	4,18	5,53	5,63	4,61	3,14	2,59	2,13	2,08	2,23	2,57	3,36	3,70
<b>1984</b>	3,40	3,16	3,58	3,91	2,63	2,26	2,04	2,03	1,98	2,05	1,79	1,87
<b>1985</b>	2,64	2,37	2,74	2,70	2,16	1,86	1,75	1,60	1,52	1,94	1,79	2,17
<b>1986</b>	2,56	2,19	1,98	1,62	1,48	1,34	1,25	1,22	1,06	1,16	1,15	1,45
<b>1987</b>	1,24	1,47	2,45	1,96	1,55	1,22	1,00	0,87	0,86	0,95	1,62	2,88
<b>1988</b>	1,53	2,09	2,65	2,74	1,71	1,49	1,33	1,19	1,03	1,68	1,98	2,45
<b>1989</b>	2,77	2,99	2,91	2,04	1,77	1,75	1,59	1,66	1,87	2,16	2,79	5,72
<b>1990</b>	4,37	4,26	3,43	3,07	2,53	2,06	2,46	1,74	2,07	1,95	2,13	2,17
<b>1991</b>	2,86	3,22	4,06	4,19	2,90	2,35	2,00	1,73	1,67	1,95	3,02	3,50
<b>1992</b>	3,87	5,83	3,80	4,32	3,08	2,54	2,20	2,00	2,06	3,24	4,76	4,67
<b>1993</b>	3,71	4,52	3,51	3,56	2,84	2,50	2,08	2,05	2,16	2,07	2,13	3,59
<b>1994</b>	3,94	3,18	4,76	3,45	2,95	2,66	2,47	1,90	1,69	1,77	2,52	2,64
<b>1995</b>	2,41	2,83	2,98	2,27	1,88	1,40	1,22	1,15	1,02	1,18	1,53	3,21
<b>1996</b>	1,59	1,47	1,58	1,70	1,29	1,10	1,06	1,03	0,97	1,54	1,99	2,21
<b>1997</b>	3,65	2,43	3,84	3,33	2,49	2,35	1,98	1,74	1,46	1,21	2,03	1,45
<b>1998</b>	1,93	2,21	2,05	1,32	1,14	0,99	0,89	0,91	0,89	1,27	2,28	3,63
<b>1999</b>	2,66	1,83	2,26	1,45	1,30	1,16	1,08	0,96	0,97	1,21	1,90	2,24
<b>2000</b>	1,94	2,20	2,62	1,96	1,57	1,36	1,27	1,26	1,37	1,31	2,18	2,09
<b>2001</b>	1,80	1,72	2,32	2,08	1,37	1,16	0,97	0,96	0,98	1,14	1,30	1,60
<b>2002</b>	2,19	2,24	1,96	1,74	1,40	1,19	1,02	0,79	0,79	0,66	1,37	1,52

\* o dado de outubro de 1981 (9,69 m<sup>3</sup>/s) foi substituído por correlação com o posto riacho Fundo Montante Zoológico.

Tabela A.6 – Vazões médias mensais, em m<sup>3</sup>/s, defluentes na barragem do Paranoá (posto fluviométrico: Barragem Paranoá - 60479200), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: CEB).

Latitude: 15° 47' 47" S						Longitude: 47° 47' 04" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	71,30	55,00	42,30	30,30	16,20	13,70	10,60	10,50	12,70	11,70	16,20	20,20
1980	49,20	73,80	30,00	30,10	19,90	14,10	13,00	9,90	10,70	9,90	15,10	27,40
1981	23,10	20,60	27,80	22,10	13,70	13,40	9,30	8,30	7,80	21,10	49,20	31,50
1982	55,30	30,50	43,00	34,80	22,70	18,60	11,80	10,40	11,80	19,00	22,00	18,70
1983	51,30	73,20	46,20	29,60	20,40	16,60	12,30	12,50	14,40	18,90	31,90	35,80
1984	29,30	22,60	24,70	35,30	16,70	10,70	9,00	11,00	13,40	16,40	12,60	15,40
1985	27,10	17,10	25,10	17,10	15,80	10,20	8,00	7,90	7,60	14,00	16,10	17,30
1986	24,90	18,80	13,50	10,00	8,60	5,60	5,00	6,80	6,90	9,60	7,40	11,70
1987	11,00	14,00	20,60	18,40	13,60	8,60	7,40	5,30	6,20	7,30	20,50	25,00
1988	20,30	22,00	36,20	27,60	15,00	10,70	7,00	7,50	6,90	11,80	17,60	21,40
1989	27,90	20,10	24,80	12,80	7,90	8,30	6,40	9,90	9,70	17,40	23,20	76,90
1990	40,00	26,20	22,60	18,20	17,90	15,40	18,00	0,00	13,70	11,00	19,70	17,60
1991	23,90	24,20	34,90	30,90	16,40	12,30	11,30	7,70	10,40	11,60	19,10	32,40
1992	26,50	54,00	27,40	30,10	19,50	12,90	11,60	11,80	13,30	22,40	31,20	38,10
1993	26,80	31,00	24,10	24,50	11,20	12,10	11,90	12,20	12,10	9,50	8,60	27,30
1994	30,90	24,90	51,90	25,10	15,50	14,00	12,70	10,40	9,40	10,30	16,90	25,80
1995	18,00	25,80	17,80	26,70	18,50	10,80	10,10	9,30	7,50	14,30	3,70	24,20
1996	16,40	16,20	19,80	15,30	7,00	7,00	4,80	4,50	9,50	10,60	13,30	19,00
1997	24,40	21,80	23,60	26,30	19,90	16,20	14,80	8,00	14,10	12,60	13,70	18,30
1998	14,20	17,40	32,10	20,90	9,80	10,10	7,20	7,00	8,50	10,50	22,80	22,50
1999	11,80	11,60	18,10	7,50	4,20	3,60	3,30	3,20	9,50	16,30	20,00	20,60
2000	27,20	19,10	32,10	18,20	12,80	8,90	6,70	7,20	7,00	14,20	21,70	18,90
2001	20,30	15,20	18,90	17,80	6,90	11,30	6,90	7,20	9,30	16,30	17,00	21,50
2002	25,00	26,80	19,60	14,10	7,70	6,10	6,40	9,40	9,60	9,80	12,70	10,10

Tabela A.7 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico da ETE Brasília Sul (01547008), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 50' 29" S						Longitude: 47° 54' 31,1"W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	499,7	170,2	194,2	85,2	23,0	0,0	1,5	9,4	56,2	103,6	198,7	162,7
1980	285,6	317,4	69,5	76,1	81,8	17,4	0,0	0,0	76,9	6,2	228,3	299,5
1981	172,4	101,0	381,8	54,9	30,6	41,4	8,3	5,2	3,1	322,1	324,7	175,3
1982	330,4	41,5	259,8	102,8	102,0	0,0	0,0	9,3	51,7	207,4	248,2	132,0
1983	285,3	270,1	282,6	228,0	60,9	0,0	12,3	0,0	64,4	270,1	468,3	426,5
1984	229,9	67,7	166,4	126,3	0,0	0,0	0,0	77,7	109,9	293,6	141,2	174,8
1985	380,7	119,6	356,2	99,4	31,0	0,0	0,0	0,0	105,8	247,2	85,2	186,2
1986	152,3	113,2	57,0	62,0	22,8	0,0	16,0	40,1	31,0	140,0	125,5	305,0
1987	164,1	161,8	45,0	297,8	80,0	36,5	0,0	0,0	52,6	65,9	190,9	229,0
1988	126,9	222,5	303,2	180,0	1,2	16,7	0,0	0,0	0,0	137,9	192,5	151,2
1989	136,7	207,1	122,7	43,6	0,0	52,0	9,0	33,2	61,4	149,1	166,0	330,5
1990	132,0	68,1	25,6	22,7	22,5	5,0	8,1	19,6	101,9	185,2	276,2	65,6
1991	329,4	187,4	216,4	150,0	2,0	0,0	0,0	0,0	18,4	105,8	243,0	273,6
1992	221,1	302,0	160,2	288,3	3,2	0,0	0,0	30,1	94,3	180,8	412,7	254,2
1993	160,4	292,0	31,8	75,5	24,6	3,0	0,0	6,1	91,0	65,7	98,4	263,9
1994	135,2	114,6	343,7	139,9	56,4	19,6	2,4	0,0	0,0	41,2	293,3	217,5
1995	226,1	176,5	254,4	193,0	32,8	0,0	0,0	0,0	2,0	83,0	246,8	198,4
1996	71,8	105,1	29,3	59,2	29,8	0,0	0,0	39,6	55,0	65,3	222,4	197,7
1997	276,9	106,2	338,7	110,5	61,2	19,5	0,0	0,0	70,0	52,5	190,6	180,6
1998	196,7	140,6	195,9	4,4	18,3	15,0	0,0	2,0	3,2	102,2	245,0	111,8
1999	72,3	126,1	294,3	70,3	7,0	0,2	0,0	0,0	85,0	155,0	266,5	224,2
2000	139,7	138,0	200,4	135,1	0,0	0,0	0,0	47,4	63,6	120,1	306,6	187,8
2001	113,5	152,6	236,5	74,0	24,8	0,0	0,0	30,7	28,2	191,2	195,8	260,5
2002	176,5	143,2	149,0	52,2	20,2	0,0	10,7	3,0	102,4	33,5	168,5	208,0

Tabela A.8 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico da ETE Brasília Norte (01547009), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 44' 36" S						Longitude: 47° 52' 38" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	554,1	200,1	264,2	49,0	71,0	0,0	0,0	15,1	40,2	111,8	200,9	201,8
1980	342,4	228,7	52,2	177,8	35,6	21,7	0,0	0,0	57,0	6,4	158,5	227,8
1981	173,0	49,4	302,4	29,8	2,6	27,0	0,0	4,0	0,7	355,4	511,3	174,0
1982	481,9	51,7	418,6	171,2	74,3	0,0	0,0	9,7	70,5	191,7	240,8	225,7
1983	412,1	228,8	202,6	122,2	31,8	0,0	29,5	1,0	75,7	205,6	371,9	243,6
1984	241,1	132,2	196,5	129,4	0,0	0,0	0,0	107,2	72,6	313,8	109,7	166,1
1985	305,3	148,6	322,0	177,6	46,5	0,0	0,0	2,9	69,6	235,0	83,4	301,2
1986	290,8	125,7	103,3	11,4	24,7	5,4	17,5	49,0	9,1	117,3	167,7	287,1
1987	188,4	145,2	302,0	138,6	65,9	3,0	0,0	2,2	76,1	113,2	280,0	381,7
1988	120,0	228,1	274,9	108,1	3,0	5,0	0,0	0,0	0,0	154,3	173,2	216,8
1989	244,6	271,8	131,9	37,4	0,0	36,0	22,2	35,6	125,2	227,0	250,0	362,5
1990	142,2	226,2	86,0	100,4	92,6	0,0	79,9	18,8	93,8	89,8	89,8	29,8
1991	213,8	193,6	216,6	126,1	0,2	0,0	0,0	0,0	21,1	94,5	240,1	256,0
1992	243,7	256,6	126,7	202,5	0,2	0,0	0,0	13,4	102,6	261,6	299,1	220,2
1993	104,0	234,0	39,8	72,4	28,2	8,8	0,0	30,7	74,6	42,0	49,6	253,6
1994	193,1	139,4	250,4	79,6	29,6	31,2	0,0	0,0	0,0	40,8	203,8	153,0
1995	184,2	138,2	177,6	126,8	37,8	0,0	0,0	0,0	0,0	99,6	121,6	258,6
1996	76,8	76,8	179,0	116,2	20,2	0,0	0,0	37,6	27,4	73,4	200,5	223,5
1997*	286,1	51,4	306,9	150,7	64,8	12,6	0,0	0,0	60,7	87,4	185,8	148,1
1998*	201,4	113,3	198,2	58,2	24,1	1,0	0,0	11,5	23,3	81,5	248,3	104,8
1999	103,1	111,6	198,0	44,8	4,8	1,8	0,0	0,0	35,4	180,6	234,2	189,8
2000	118,6	138,9	206,6	66,5	0,0	0,0	0,5	45,0	88,1	135,2	319,3	112,2
2001	72,7	79,8	182,1	100,4	20,6	0,0	0,0	44,4	39,1	140,2	218,5	171,2
2002	231,8	187,4	166,7	47,8	30,1	0,0	10,6	8,8	57,4	63,4	165,6	258,7

\* as falhas de dezembro de 1997 e janeiro e fevereiro de 1998 foram preenchidas pelo método do Vetor Regional.

Tabela A.9 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do Contagem (01547010), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 39' 11" S						Longitude: 47° 52' 44" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	784,3	375,2	303,8	71,5	60,7	0,0	0,0	19,7	13,1	112,2	140,7	202,0
1980	440,9	423,8	87,1	213,3	118,7	9,0	0,0	0,0	89,2	2,8	237,5	250,0
1981	225,5	120,8	354,4	40,6	37,8	45,5	19,2	12,4	6,0	400,5	351,1	87,2
1982	418,7	78,9	352,4	121,1	101,9	0,0	0,0	12,4	6,0	403,7	337,8	134,6
1983	321,6	367,0	259,6	150,9	42,4	0,0	22,9	0,0	52,7	182,3	294,9	173,9
1984	167,4	159,2	299,7	174,0	6,9	0,0	0,0	30,1	63,0	186,6	87,0	164,4
1985	367,2	146,0	255,4	80,0	29,7	0,0	0,0	0,0	10,4	236,6	146,6	399,0
1986	215,2	138,5	143,8	35,4	9,3	0,0	14,4	65,6	8,6	167,2	108,4	226,1
1987	74,2	150,9	388,2	126,3	61,8	0,5	0,0	0,0	79,2	87,3	200,8	373,2
1988	107,3	256,1	287,1	165,2	24,1	1,6	0,0	0,0	5,2	172,3	346,6	182,2
1989	199,8	241,5	205,9	51,6	1,2	45,8	25,1	59,7	86,9	207,2	232,9	757,1
1990	152,4	195,6	112,1	107,7	96,9	0,0	119,7	20,2	129,3	147,6	222,0	85,2
1991	267,9	192,6	328,5	137,7	4,6	0,0	0,0	0,0	22,6	56,9	222,6	284,0
1992	352,2	392,2	140,3	168,1	21,2	0,0	0,0	41,1	69,3	180,4	302,4	417,5
1993	110,4	206,5	72,9	83,5	20,4	11,6	0,0	33,4	115,3	69,6	110,0	309,0
1994	227,1	131,5	388,2	128,6	35,0	39,6	0,0	0,0	0,0	54,1	291,1	213,4
1995	150,7	128,5	216,4	162,9	42,4	0,0	0,0	0,0	0,0	150,7	174,6	357,8
1996	93,2	75,0	147,6	90,4	21,3	0,0	0,0	113,6	26,3	93,1	254,3	189,7
1997	516,7	88,9	371,7	178,6	73,6	20,0	0,0	0,0	69,4	57,8	267,1	217,1
1998	240,3	148,0	208,5	87,4	38,9	16,3	0,0	3,3	9,4	177,6	282,2	270,4
1999	224,5	49,5	254,5	45,3	23,6	0,0	0,0	0,0	50,3	242,1	353,0	265,9
2000	205,1	105,9	188,0	75,8	0,0	0,0	0,0	34,5	39,0	167,4	229,6	250,8
2001	68,4	74,2	257,6	116,3	13,6	0,0	1,4	34,9	68,2	208,2	291,5	353,4
2002	264,6	181,5	136,6	44,2	5,2	0,0	1,4	10,4	48,6	13,8	207,6	207,5



Tabela A.10 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico da Área Alfa (01547014), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 58' 45" S						Longitude: 47° 58' 30" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>1979</b>	537,7	457,0	222,4	144,6	20,4	0,0	3,8	18,2	128,6	88,2	318,4	163,2
<b>1980</b>	361,8	416,4	67,6	118,0	20,8	5,0	0,0	0,0	54,2	32,2	233,8	355,6
<b>1981</b>	288,4	84,4	264,4	60,0	6,2	42,0	14,0	32,4	18,0	350,2	352,7	264,5
<b>1982</b>	407,2	35,6	322,2	71,6	122,0	0,0	0,0	6,8	56,0	142,4	73,8	179,0
<b>1983</b>	426,0	297,2	343,0	141,2	58,0	0,0	23,6	0,0	45,6	171,6	334,0	255,5
<b>1984</b>	134,0	97,4	145,2	88,4	4,0	0,0	0,0	53,8	87,1	85,1	101,1	202,7
<b>1985</b>	271,1	154,4	169,4	83,3	55,4	0,0	0,0	1,2	70,4	128,4	55,1	83,0
<b>1986</b>	115,2	109,0	177,7	41,6	16,0	0,0	41,0	39,0	5,1	93,0	115,4	154,1
<b>1987</b>	91,0	79,4	154,3	231,2	13,4	1,0	0,0	0,2	62,6	55,3	244,8	153,6
<b>1988</b>	161,5	224,7	103,9	148,6	4,2	19,1	0,0	0,0	8,2	271,2	128,1	182,5
<b>1989</b>	98,4	160,0	100,3	36,8	0,0	36,0	13,0	23,8	81,7	124,6	449,8	351,9
<b>1990</b>	167,2	142,9	77,8	72,5	103,2	0,0	12,4	16,0	143,1	121,0	148,2	176,1
<b>1991</b>	160,9	352,4	257,2	108,1	25,3	0,0	0,0	0,0	50,4	62,3	322,4	317,0
<b>1992</b>	235,2	272,1	86,4	162,2	27,3	0,0	0,0	60,3	85,9	196,8	385,4	225,9
<b>1993</b>	99,2	314,7	111,4	143,6	37,2	9,2	0,0	32,1	47,3	73,5	129,6	401,3
<b>1994</b>	330,5	84,6	391,6	142,1	26,3	22,4	6,0	0,0	0,0	32,3	218,5	389,1
<b>1995</b>	155,8	178,8	244,6	233,0	34,3	0,0	0,0	0,0	10,3	131,4	340,8	164,7
<b>1996</b>	93,5	137,6	186,3	48,4	100,0	0,0	0,0	39,3	8,3	43,5	277,7	285,4
<b>1997</b>	255,7	89,8	333,4	62,8	74,2	9,7	0,0	0,0	162,6	108,6	206,7	115,7
<b>1998</b>	265,4	309,7	171,6	98,5	18,9	14,3	0,0	0,0	3,2	165,4	319,0	245,3
<b>1999</b>	94,0	92,0	220,7	78,3	19,4	0,0	0,0	0,0	83,4	167,4	277,9	228,7
<b>2000</b>	326,0	173,2	191,9	128,7	0,0	0,0	0,0	49,7	160,7	103,2	252,2	344,1
<b>2001</b>	139,5	280,7	357,4	97,0	29,0	0,0	0,0	45,8	42,8	174,5	214,9	147,4
<b>2002</b>	236,6	232,5	270,5	40,2	2,0	0,0	0,0	0,0	105,6	114,0	282,5	161,8

Tabela A.11 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico de Santa Maria (01547017), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 40' 12" S						Longitude: 47° 57' 09" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	436,4	266,5	212,7	60,5	40,5	0,0	0,0	26,2	21,5	62,2	38,2	104,0
1980	179,6	229,2	44,8	114,3	61,2	4,4	0,0	0,0	46,3	37,3	172,6	209,8
1981	175,5	45,2	303,0	27,0	4,0	28,1	15,3	0,9	1,6	303,8	296,8	140,4
1982	311,7	27,8	294,2	77,2	68,6	0,0	0,0	7,4	62,1	177,1	-	-
1983	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1984	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1985	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1986	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1987	151,1	179,4	371,1	146,6	52,5	0,7	0,0	0,0	76,8	85,0	99,1	236,6
1988	32,7	175,5	120,9	133,4	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	113,2	160,7	112,2
1989	152,4	265,2	155,0	40,2	0,0	52,5	20,0	67,1	73,5	194,4	233,9	557,5
1990	132,8	146,5	60,0	69,0	74,0	0,0	56,7	24,0	68,4	141,7	173,7	59,3
1991	200,3	115,2	227,8	110,9	0,0	0,0	0,0	0,0	54,9	56,5	154,0	202,2
1992	342,0	278,3	83,4	174,3	50,5	0,0	0,0	24,5	94,7	205,8	262,5	296,4
1993	139,4	206,5	98,3	45,8	31,4	14,0	0,0	24,3	63,1	21,5	126,3	276,6
1994	233,4	176,1	177,6	127,0	49,0	6,2	0,0	0,0	0,0	37,7	266,5	117,3
1995	163,8	142,3	220,4	135,9	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	87,7	236,5	273,8
1996	28,5	79,1	129,9	76,7	13,1	0,0	0,0	35,1	31,9	78,5	182,3	209,0
1997	486,5	84,1	390,4	178,6	74,6	19,1	0,0	0,0	94,1	31,2	212,5	104,4
1998	317,2	148,2	177,5	79,6	22,6	0,0	0,0	10,2	16,2	75,4	354,8	168,4
1999	73,6	41,8	140,8	27,0	1,9	0,0	0,0	0,0	46,2	239,2	251,1	195,0
2000	143,2	182,9	152,2	76,6	0,0	0,0	3,0	52,8	63,0	87,0	232,5	138,2
2001	60,4	108,7	214,6	76,2	12,5	0,0	0,0	35,4	33,6	116,8	192,3	246,8
2002	180,3	129,8	107,7	46,0	8,0	-	0,2	4,4	62,2	9,1	145,5	291,6

Tabela A.12 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do Jockey Clube (01547018), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 48' 21" S						Longitude: 47° 59' 53" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	350,1	152,0	149,0	80,9	45,3	0,0	0,0	38,6	44,0	97,7	146,4	218,6
1980	454,2	364,5	96,9	140,3	79,4	20,8	0,0	0,0	70,8	25,2	224,4	194,4
1981	167,7	79,7	207,2	25,2	18,4	18,8	9,4	7,6	3,2	336,6	305,1	191,9
1982	340,0	74,0	234,4	59,7	74,7	0,0	0,0	12,4	81,5	185,2	144,7	130,2
1983	294,0	287,8	247,0	188,6	49,3	0,0	22,0	0,0	59,9	195,4	211,7	219,7
1984	150,5	154,4	153,0	137,7	0,0	0,0	0,0	78,1	57,5	228,9	98,0	130,8
1985	255,1	167,4	169,8	41,0	35,2	0,0	0,0	5,8	32,0	215,7	100,6	254,6
1986	224,3	93,4	118,9	103,1	13,4	0,0	15,8	48,7	13,6	96,8	128,3	234,5
1987	204,0	175,8	312,8	180,7	82,1	29,7	0,0	0,0	36,7	116,5	400,8	263,4
1988	115,8	281,1	163,7	109,9	17,1	8,6	0,0	0,0	0,0	174,6	140,3	182,9
1989	273,7	237,1	81,4	74,4	0,0	33,4	14,8	101,6	144,6	89,2	401,9	471,1
1990	179,5	228,4	138,7	109,4	64,5	0,0	80,2	20,8	86,1	105,4	211,2	163,1
1991	318,4	235,4	224,6	120,2	14,2	0,0	0,0	0,0	50,8	150,1	337,1	322,7
1992	345,6	323,2	152,5	240,6	32,8	0,0	0,0	46,2	109,6	300,2	357,6	286,6
1993	71,2	335,2	157,6	108,4	30,6	15,0	0,0	46,1	50,3	91,6	139,2	436,2
1994	210,0	140,8	318,1	160,9	37,0	21,0	4,8	0,0	0,0	51,7	298,8	258,8
1995	161,8	128,2	195,0	165,6	8,4	0,0	0,0	0,0	1,8	162,0	181,0	276,2
1996	86,2	123,0	177,4	161,0	37,6	0,0	0,0	45,4	28,8	58,4	307,0	234,8
1997	369,0	127,0	458,6	153,8	90,0	21,2	0,0	0,0	107,2	75,0	167,2	180,6
1998	296,8	235,0	215,2	69,6	6,8	16,6	0,0	3,4	11,8	75,8	273,0	223,9
1999	57,2	103,2	197,2	73,2	41,0	3,0	0,0	0,0	72,4	151,0	303,8	292,2
2000	219,6	191,0	236,4	91,8	0,0	0,0	0,0	40,6	114,0	146,2	264,6	150,4
2001	145,4	165,8	230,0	52,0	29,8	0,0	5,4	46,6	39,8	143,8	227,2	268,4
2002	216,0	222,6	177,0	100,2	14,6	0,0	4,4	11,8	57,0	48,6	239,6	190,8

Tabela A.13 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do Cabeça de Veado (01547019), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 53' 27" S						Longitude: 47° 50' 44" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	249,2	181,0	296,6	111,0	49,0	0,0	0,0	19,5	67,2	119,0	188,8	270,7
1980	304,8	372,4	62,1	118,3	38,1	16,8	0,0	0,0	68,3	24,9	291,7	350,0
1981	247,5	90,1	247,2	108,9	10,3	29,7	14,7	12,0	9,3	322,8	340,8	187,2
1982	424,8	32,0	237,8	117,0	142,1	0,0	0,7	38,1	54,7	122,3	264,9	222,7
1983	414,2	288,0	351,1	45,3	50,8	0,0	26,3	0,0	39,8	220,8	304,1	284,6
1984	76,0	67,8	90,4	105,3	0,0	0,0	0,0	37,3	71,1	146,3	107,1	161,7
1985	330,3	154,3	268,5	118,4	22,9	0,0	0,0	0,0	82,4	135,5	159,9	372,2
1986	207,5	77,0	58,2	90,0	13,1	0,1	67,7	63,0	9,9	80,1	207,4	238,1
1987	165,4	160,3	167,6	236,4	69,4	0,8	0,0	0,0	61,0	97,9	350,9	315,7
1988	128,8	277,4	302,0	126,0	12,4	4,8	0,0	0,0	6,4	199,0	173,6	300,0
1989	180,7	165,7	169,8	29,6	0,0	44,8	13,2	57,6	47,3	168,3	288,4	416,3
1990	115,5	80,1	105,5	69,2	55,0	0,0	64,4	19,6	80,4	130,7	128,4	52,9
1991	245,3	203,7	293,5	107,8	13,8	0,0	0,0	0,0	12,6	66,2	333,7	322,4
1992	222,8	222,5	116,0	183,5	9,2	0,0	0,0	28,6	54,0	148,6	282,9	264,0
1993	193,7	242,5	54,2	72,6	48,6	19,8	0,0	25,7	64,2	48,7	161,0	407,0
1994	267,1	148,5	426,9	135,5	39,4	21,4	0,0	0,0	0,0	61,0	350,6	319,9
1995	258,4	242,8	251,6	290,6	38,8	0,0	0,0	0,0	4,2	82,5	240,9	308,6
1996	92,0	178,3	299,1	105,6	18,8	0,0	0,0	57,1	55,6	38,9	247,4	229,4
1997	341,4	88,2	332,0	142,2	50,6	14,0	0,0	0,0	51,4	40,0	173,2	234,3
1998	232,6	242,7	213,4	63,2	14,8	0,0	0,0	5,2	0,4	157,8	311,1	139,2
1999	68,5	85,9	236,3	61,5	0,0	1,1	0,0	0,0	97,9	187,5	343,4	174,4
2000	84,7	145,7	274,2	156,9	6,3	0,0	1,1	51,7	116,4	107,5	238,0	173,9
2001	75,9	103,8	184,1	97,1	24,1	0,0	6,3	30,3	40,4	143,7	193,7	211,8
2002	185,0	177,1	135,4	52,0	41,6	0,0	5,4	33,2	110,3	23,0	139,3	157,9

Tabela A.14 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico da Barragem do Paranoá (01547020), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 47' 48" S						Longitude: 47° 47' 01" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	536,5	161,1	173,2	92,4	87,6	6,0	0,0	4,5	16,3	74,9	119,8	93,3
1980	182,6	186,9	97,4	110,1	10,2	21,8	0,0	0,0	45,4	14,0	197,8	315,1
1981	197,7	62,3	397,9	20,1	19,7	42,0	31,6	14,2	4,6	299,0	391,4	143,6
1982	301,7	122,1	313,1	91,5	81,6	0,0	0,0	11,1	43,3	126,4	187,1	207,9
1983	503,1	327,1	339,5	127,3	33,4	0,0	25,3	0,0	7,3	208,4	335,1	174,8
1984	157,7	83,5	180,0	147,8	0,0	0,0	0,0	43,8	44,2	210,9	139,7	94,8
1985	192,8	192,9	198,0	104,4	45,5	0,0	0,0	0,0	23,0	74,6	109,7	184,7
1986	117,4	170,4	51,8	26,2	31,8	0,0	20,6	28,8	6,0	89,9	120,5	222,6
1987	138,8	108,2	162,6	92,6	45,0	15,0	0,0	2,1	97,6	74,2	157,2	224,8
1988	139,3	234,0	303,2	83,7	1,0	21,2	0,0	0,0	8,3	137,2	128,5	197,1
1989	154,6	184,1	110,4	27,4	0,0	23,4	9,8	63,2	42,2	183,9	261,0	353,6
1990	108,6	134,5	8,6	141,8	42,4	0,0	65,6	20,2	44,3	82,6	171,7	91,2
1991	246,4	156,1	248,3	101,3	0,0	0,0	0,0	0,0	60,0	70,3	199,0	362,1
1992	256,1	280,9	86,0	164,2	1,4	0,0	0,0	21,2	54,1	184,2	296,6	227,5
1993	105,9	142,3	23,4	76,6	22,2	32,0	0,0	21,7	17,7	93,6	107,3	263,2
1994	174,6	98,0	363,9	114,0	14,0	49,7	0,8	0,0	0,0	67,3	225,9	186,2
1995	192,6	128,1	213,9	81,5	67,3	0,9	0,0	0,0	0,0	103,8	321,5	243,8
1996	108,9	115,3	234,7	78,7	29,5	0,0	0,0	30,5	71,4	73,3	198,2	132,7
1997	264,4	36,4	298,4	89,7	24,7	21,1	0,0	0,0	71,7	79,6	155,6	271,3
1998	280,4	150,9	138,7	45,3	37,0	8,7	0,0	5,6	3,8	169,9	220,4	169,8
1999	104,1	52,1	187,7	50,4	0,6	1,1	0,0	0,0	45,1	245,3	315,9	327,0
2000	143,7	254,5	236,6	99,2	0,6	0,0	0,0	42,2	96,3	84,3	285,8	200,0
2001	176,3	92,5	414,1	59,7	17,5	0,0	0,0	31,0	75,6	179,9	304,7	189,7
2002	278,5	306,8	111,1	20,7	33,9	0,0	2,2	6,1	38,5	44,9	217,8	259,7

Tabela A.15 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do Jatobazinho (01548009), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 42' 43" S						Longitude: 48° 05' 33" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	513,0	193,1	179,3	110,8	42,1	0,0	0,0	26,0	41,3	98,3	246,2	319,4
1980	348,0	340,8	51,6	218,2	27,4	11,4	0,0	0,0	83,0	23,6	296,1	220,1
1981	195,5	128,6	326,8	103,1	46,9	30,4	30,7	2,8	38,8	356,4	320,0	260,2
1982	339,4	66,6	301,4	163,0	71,2	0,0	0,0	24,4	64,8	198,0	102,0	254,1
1983	420,7	249,3	265,1	129,9	25,6	0,0	30,9	0,0	59,1	190,1	237,0	242,4
1984	165,7	178,5	226,9	80,0	7,8	0,0	0,0	28,0	65,5	161,5	86,8	150,6
1985	395,9	125,5	182,2	194,5	16,9	0,0	0,0	4,1	25,9	164,5	86,8	388,9
1986	274,0	91,0	141,4	62,3	10,5	0,0	0,0	46,8	22,9	146,8	118,8	238,2
1987	178,2	137,0	402,7	175,0	55,4	13,4	0,0	0,0	28,6	182,1	243,2	360,9
1988	122,0	170,0	308,3	55,6	2,4	0,0	0,0	13,6	10,8	98,0	206,9	161,9
1989	287,4	252,1	197,3	124,9	0,0	34,0	0,0	14,4	62,0	263,4	171,7	599,6
1990	240,8	241,5	91,5	175,9	38,0	0,0	82,6	26,4	84,8	213,8	139,2	171,7
1991	266,4	220,4	275,4	174,3	31,8	0,0	0,0	0,0	34,6	122,2	155,8	262,8
1992	356,4	333,0	136,1	270,1	40,6	2,7	0,0	13,8	68,3	209,4	298,8	381,8
1993	136,7	226,6	108,3	83,8	32,0	11,0	0,0	35,2	81,0	93,0	115,4	328,8
1994	222,9	178,1	411,6	119,4	39,6	26,2	6,8	0,0	0,0	47,0	341,4	193,4
1995	217,8	88,8	251,2	190,6	22,6	0,0	0,0	0,0	5,2	92,6	252,9	300,8
1996	92,9	106,6	227,2	107,2	48,2	0,6	0,0	17,0	33,2	172,0	251,2	125,4
1997	92,9	135,4	227,2	152,4	48,2	22,6	0,0	0,0	33,2	56,6	251,2	157,0
1998	233,4	170,0	237,8	55,6	13,6	0,0	0,0	13,6	5,6	98,0	311,4	161,9
1999	160,4	86,0	260,1	64,8	5,8	2,2	0,0	0,0	58,2	148,0	375,4	265,3
2000	215,2	192,4	260,8	61,0	0,0	0,0	0,0	25,1	69,7	96,6	286,2	242,8
2001	96,8	187,7	245,1	24,3	24,8	0,0	0,0	35,0	51,8	125,9	262,0	261,7
2002	169,5	165,1	113,1	83,4	0,0	0,0	0,0	5,1	70,3	60,0	142,9	186,5

Tabela A.16 – Precipitações totais mensais, em mm, do posto pluviométrico do riacho Fundo GM-3 (01548010), de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

Latitude: 15° 53' 09" S						Longitude: 48° 02' 37" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	480,6	182,4	327,6	123,8	30,4	0,0	3,2	30,2	49,8	95,5	200,8	240,4
1980	414,6	440,6	127,4	105,2	15,3	27,0	0,0	0,0	84,5	31,4	323,2	311,0
1981	236,9	53,6	246,4	54,4	15,0	43,0	13,2	9,2	5,8	322,2	500,2	171,3
1982	281,5	72,8	236,1	142,6	79,2	0,0	3,4	11,0	78,4	175,1	171,6	297,0
1983	284,6	394,9	244,2	99,1	111,0	0,0	31,2	0,0	84,4	103,6	359,4	251,3
1984	137,2	125,4	209,9	72,4	17,2	0,0	0,0	78,6	114,5	134,1	89,4	231,1
1985	270,9	88,6	132,4	77,9	55,8	0,0	1,6	7,2	108,9	130,8	214,1	210,4
1986	182,2	126,1	134,0	57,3	8,0	0,0	36,3	78,1	22,7	92,9	112,7	239,2
1987	63,8	141,0	251,1	231,0	29,0	10,8	0,0	0,0	45,3	152,3	311,9	256,2
1988	108,9	233,4	295,2	175,1	13,2	17,5	0,0	0,0	2,1	189,8	147,1	307,1
1989	202,8	264,3	205,6	51,4	0,0	47,9	35,4	51,3	104,1	184,1	374,9	438,7
1990	148,0	233,2	119,3	66,1	79,3	0,0	62,2	18,3	83,4	193,1	252,4	118,6
1991	256,0	289,6	248,7	129,5	11,0	0,0	0,0	0,0	36,4	94,7	264,3	334,4
1992	302,1	266,8	146,5	265,3	10,5	0,0	0,0	35,4	74,9	244,3	294,6	348,0
1993	55,6	315,5	138,0	113,6	18,9	21,8	0,0	32,8	59,6	116,8	138,3	432,8
1994	278,3	174,5	360,6	152,0	22,5	24,6	1,2	0,0	0,0	65,2	274,2	261,5
1995	232,7	179,8	264,4	162,2	12,6	0,0	0,0	0,0	0,0	134,1	166,8	246,0
1996	82,2	236,0	131,6	59,4	34,8	0,0	0,0	36,7	42,6	88,4	278,6	166,0
1997	273,2	102,2	330,2	111,5	139,8	25,6	0,0	0,0	223,8	70,8	198,0	148,2
1998	256,8	286,4	272,2	40,6	23,0	6,2	0,0	0,0	13,4	157,6	302,6	263,0
1999	120,8	128,8	401,6	42,2	61,0	0,0	0,0	0,0	104,0	88,0	240,8	249,6
2000	274,3	192,6	268,4	87,6	0,0	0,0	0,0	44,6	125,2	118,6	250,2	281,8
2001	117,8	173,6	252,2	62,2	34,6	0,0	0,0	43,6	63,6	135,2	175,8	216,2
2002	228,8	249,4	117,4	111,6	7,6	0,0	6,2	1,2	118,4	60,6	277,4	209,6

Tabela A.17 – Vazões efluentes totais mensais, em m<sup>3</sup>/s, lançadas pela ETE Brasília Sul no lago Paranoá, de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>1979</b>	0,541	0,582	0,636	0,611	0,605	0,571	0,548	0,574	0,584	0,609	0,620	0,615
<b>1980</b>	0,660	0,682	0,676	0,668	0,656	0,626	0,610	0,634	0,655	0,690	0,610	0,588
<b>1981</b>	0,563	0,563	0,560	0,700	0,550	0,580	0,580	0,548	0,550	0,502	0,549	0,525
<b>1982</b>	0,670	0,710	0,618	0,609	0,608	0,593	0,528	0,522	0,537	0,531	0,542	0,514
<b>1983</b>	0,512	0,529	0,545	0,461	0,325	0,455	0,509	0,543	0,553	0,556	0,574	0,566
<b>1984</b>	0,516	0,554	0,568	0,562	0,561	0,548	0,517	0,570	0,552	0,568	0,577	0,548
<b>1985</b>	0,539	0,543	0,606	0,596	0,565	0,557	0,547	0,573	0,574	0,563	0,564	0,515
<b>1986</b>	0,502	0,523	0,567	0,584	0,570	0,643	0,526	0,546	0,557	0,543	0,540	0,524
<b>1987</b>	0,460	0,530	0,540	0,550	0,520	0,500	0,510	0,490	0,550	0,580	0,580	0,550
<b>1988</b>	0,493	0,532	0,597	0,553	0,545	0,554	0,500	0,525	0,536	0,547	0,551	0,503
<b>1989</b>	0,456	0,531	0,554	0,534	0,525	0,553	0,515	0,567	0,539	0,510	0,573	0,581
<b>1990*</b>	0,537	0,571	0,580	0,584	0,548	0,562	0,535	0,554	0,562	0,564	0,571	0,548
<b>1991*</b>	0,537	0,571	0,580	0,584	0,548	0,562	0,535	0,554	0,562	0,564	0,571	0,548
<b>1992</b>	0,857	0,994	0,897	0,993	0,832	0,825	0,772	0,781	0,814	0,896	0,863	0,702
<b>1993</b>	0,672	0,899	0,896	0,877	0,824	0,818	0,779	0,834	0,826	0,791	0,838	0,988
<b>1994</b>	0,832	0,866	1,152	0,975	0,903	0,869	0,832	0,872	0,895	0,902	1,015	0,995
<b>1995</b>	0,898	1,004	1,039	1,070	0,984	0,913	0,850	0,800	0,885	1,009	1,022	1,010
<b>1996</b>	0,883	0,957	1,045	0,978	0,907	0,889	0,837	0,901	0,899	0,923	1,033	0,999
<b>1997</b>	0,840	0,865	0,982	0,966	0,852	0,894	0,778	0,765	0,916	0,951	1,001	0,996
<b>1998</b>	0,920	0,983	1,083	1,018	0,864	0,839	0,798	0,857	0,879	0,896	1,013	0,969
<b>1999</b>	0,872	0,944	1,119	0,922	0,870	0,818	0,780	0,818	0,902	0,985	1,091	1,083
<b>2000</b>	0,905	0,923	1,012	0,930	0,836	0,782	0,787	0,846	0,903	0,948	1,089	0,999
<b>2001</b>	0,962	0,987	1,132	1,030	0,945	0,776	0,777	0,781	0,813	0,894	0,972	1,043
<b>2002</b>	1,034	1,108	1,053	1,033	0,898	0,839	0,898	0,834	0,887	0,938	0,992	1,103

\* as falhas de 1990 e 1991 foram preenchidas com os valores médios mensais do período de 1979 a 1989.



Tabela A.18 – Vazões efluentes totais mensais, em m<sup>3</sup>/s, lançadas pela ETE Brasília Norte no lago Paranoá, de 1979 a 2002 (fonte dos dados: Caesb).

ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>1979*</b>	0,280	0,304	0,310	0,308	0,295	0,291	0,285	0,292	0,295	0,297	0,293	0,297
<b>1980</b>	0,244	0,257	0,266	0,275	0,257	0,265	0,251	0,260	0,268	0,290	0,305	0,283
<b>1981</b>	0,273	0,283	0,303	0,294	0,289	0,288	0,261	0,252	0,270	0,287	0,228	0,251
<b>1982</b>	0,300	0,330	0,318	0,303	0,310	0,310	0,303	0,257	0,320	0,310	0,320	0,310
<b>1983</b>	0,310	0,320	0,330	0,320	0,300	0,280	0,297	0,335	0,321	0,321	0,337	0,328
<b>1984</b>	0,287	0,310	0,321	0,319	0,274	0,276	0,263	0,277	0,265	0,273	0,232	0,274
<b>1985</b>	0,265	0,331	0,344	0,354	0,342	0,329	0,321	0,363	0,336	0,339	0,325	0,308
<b>1986</b>	0,298	0,322	0,340	0,356	0,325	0,339	0,332	0,333	0,343	0,337	0,328	0,328
<b>1987</b>	0,265	0,302	0,304	0,288	0,280	0,285	0,294	0,282	0,283	0,284	0,285	0,293
<b>1988</b>	0,272	0,300	0,301	0,292	0,291	0,256	0,251	0,278	0,260	0,232	0,276	0,285
<b>1989</b>	0,283	0,286	0,286	0,276	0,281	0,279	0,277	0,282	0,287	0,296	0,296	0,309
<b>1990*</b>	0,280	0,304	0,310	0,308	0,295	0,291	0,285	0,292	0,295	0,297	0,293	0,297
<b>1991*</b>	0,280	0,304	0,310	0,308	0,295	0,291	0,285	0,292	0,295	0,297	0,293	0,297
<b>1992</b>	0,362	0,447	0,406	0,421	0,409	0,394	0,370	0,368	0,378	0,391	0,411	0,403
<b>1993</b>	0,371	0,392	0,425	0,401	0,391	0,395	0,388	0,402	0,415	0,400	0,412	0,397
<b>1994</b>	0,370	0,361	0,412	0,383	0,388	0,379	0,363	0,378	0,381	0,370	0,388	0,372
<b>1995</b>	0,348	0,376	0,401	0,383	0,369	0,356	0,333	0,367	0,380	0,384	0,400	0,382
<b>1996</b>	0,339	0,358	0,382	0,368	0,348	0,316	0,309	0,332	0,358	0,353	0,337	0,324
<b>1997</b>	0,308	0,338	0,368	0,389	0,358	0,338	0,335	0,351	0,386	0,401	0,424	0,408
<b>1998</b>	0,370	0,418	0,475	0,455	0,406	0,379	0,361	0,416	0,439	0,414	0,418	0,401
<b>1999</b>	0,349	0,368	0,417	0,397	0,387	0,381	0,359	0,378	0,405	0,417	0,428	0,411
<b>2000</b>	0,358	0,429	0,439	0,420	0,402	0,400	0,398	0,433	0,437	0,465	0,471	0,443
<b>2001</b>	0,421	0,447	0,484	0,469	0,425	0,399	0,372	0,400	0,416	0,424	0,439	0,433
<b>2002</b>	0,420	0,447	0,480	0,455	0,422	0,396	0,399	0,419	0,438	0,479	0,458	0,455

\* as falhas de 1979, 1990 e 1991 foram preenchidas com os valores médios mensais do período de 1980 a 1989.

Tabela A.19 – Evaporação média mensal, em mm/dia, do tanque evaporimétrico tipo classe A da Estação UnB-I, de 1979 a 2002 (fonte dos dados: ENC/UnB).

Latitude: 15° 44' 10" S						Longitude: 47° 52' 54" W						
ano\mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1979	3,32	4,32	4,46	4,11	4,08	4,05	4,26	4,93	5,10	6,16	5,29	4,63
1980	3,75	3,46	5,11	4,55	3,95	3,82	4,40	5,40	5,07	6,35	3,85	4,01
1981	4,62	6,24	4,00	4,08	3,78	3,64	3,84	4,88	5,69	3,53	2,97	4,00
1982	2,87	5,18	3,49	4,60	3,28	3,50	3,50	3,50	4,90	4,86	4,51	3,95
1983	3,17	3,73	3,15	3,70	3,45	3,46	3,32	4,68	4,65	4,05	3,95	4,13
1984	5,13	5,53	4,18	3,75	3,59	3,44	3,59	3,10	3,40	4,30	4,76	3,96
1985	2,96	5,19	3,74	3,48	3,68	3,51	3,69	4,65	4,66	3,96	3,99	3,62
1986	4,04	4,21	3,74	4,05	3,59	3,30	3,35	3,74	4,91	4,13	4,17	3,46
1987	4,40	3,79	3,21	3,45	3,40	3,32	4,30	5,03	5,22	5,19	3,38	3,04
1988	4,98	3,69	3,83	3,80	3,74	3,30	4,09	5,11	6,14	4,24	3,90	4,05
1989	4,56	4,09	3,97	4,06	3,68	3,05	4,15	3,80	4,18	4,28	3,57	2,54
1990	5,19	3,88	4,17	3,83	3,11	3,38	2,99	3,64	4,24	4,51	4,25	4,11
1991	3,43	3,25	3,03	3,11	3,10	3,33	3,55	4,49	4,30	4,79	3,65	3,09
1992	2,28	2,84	3,43	3,30	3,67	3,45	3,69	4,12	3,53	4,08	3,65	3,30
1993	5,02	3,70	4,74	3,89	3,50	3,25	3,89	3,97	4,23	4,81	4,73	3,47
1994	4,05	4,61	3,05	3,49	3,43	3,30	3,42	4,76	6,06	5,55	4,65	3,93
1995	4,11	4,23	4,14	3,57	3,24	3,44	4,11	5,21	6,02	5,19	4,36	3,59
1996*	5,01	5,10	3,83	3,50	3,40	3,49	3,82	4,50	4,90	4,69	3,29	4,15
1997*	3,98	4,63	4,76	3,83	3,56	3,28	3,57	4,93	4,98	5,56	4,81	4,05
1998*	4,10	3,50	4,05	4,51	3,56	3,49	5,08	5,54	6,56	4,28	3,30	4,38
1999*	4,84	5,20	3,88	4,83	4,65	4,28	4,50	5,43	4,92	4,72	3,90	4,63
2000*	4,10	4,80	3,80	4,80	5,00	4,15	3,82	5,09	5,32	5,38	4,32	3,73
2001*	4,10	5,11	4,16	3,83	3,56	3,49	3,82	4,50	4,90	4,72	4,11	3,73
2002*	4,10	3,92	4,48	4,89	4,74	3,49	3,82	4,50	4,90	4,72	4,11	3,73

\* número: média dos valores da série mensal completa;

número: média dos valores da série mensal com falhas em fins-de-semana e feriados;

número: falhas preenchidas com os valores médios de longo período (1972 a 1995).

## **APÊNDICE B**

### **RELAÇÃO DAS PESSOAS CONSULTADAS NA ETAPA DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA**

#### **Paulo Sérgio Bretas Salles**

Professor de Ecologia do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília  
Presidente da Comissão Pró-Comitê da Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá

#### **Mônica de Andrade Gonçalves Branco**

Funcionária da Caixa Econômica Federal  
Professora da Pós-Graduação Latosensu em Gestão Ambiental de Cidades, da  
Universidade Católica de Brasília

#### **Gustavo Souto Maior Salgado**

M.Sc. em Gestão Econômica do Meio Ambiente  
Presidente da Associação dos Amigos do Parque Nacional de Brasília (AFAM)

#### **David José de Mattos**

Diretor-Presidente da Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal –  
ADASA

#### **Mônica Veríssimo dos Santos**

Pesquisadora do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília  
Presidente da ONG Fundação Sustentabilidade e Desenvolvimento

#### **Fernando Starling**

Biólogo da Companhia de Saneamento do Distrito Federal  
Professor da Universidade Católica de Brasília

**Ruben Sotto Maior Filho**

Engenheiro Civil da Companhia de Saneamento do Distrito Federal

**Wagner Francisco Moreti**

**Ramon Morel Filho**

**Valdir Ferreira dos Santos**

**José Eustáquio Fernandino**

**Helena Lúcia de Faria**

Funcionários da Companhia de Eletricidade de Brasília

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)