

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DEFINIÇÃO DE REGRAS OPERATIVAS DE RESERVATÓRIOS COM  
USOS MÚLTIPLOS: O CASO DA BARRAGEM DO BICO DA PEDRA

LUCIANA DE OLIVEIRA BARCELLOS

ORIENTADOR: OSCAR DE MORAES CORDEIRO NETTO  
CO-ORIENTADOR: NÉSTOR ALDO CAMPANA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS  
HÍDRICOS

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM-059A/2003

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO - 2003

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**DEFINIÇÃO DE REGRAS OPERATIVAS DE  
RESERVATÓRIOS COM USOS MÚLTIPLOS: O CASO DA  
BARRAGEM DO BICO DA PEDRA**

**LUCIANA DE OLIVEIRA BARCELLOS**

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

APROVADA POR:

---

PROF. Oscar de Moraes Cordeiro Netto, Doutor (ENC-UnB)  
(ORIENTADOR)

---

PROF. Néstor Aldo Campana, PhD (ENC-UnB)  
(CO-ORIENTADOR)

---

PROF. Nabil Joseph Eid, Doutor (ENC-Unb)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

PROF. Benedito P. F. Braga Júnior, PhD (EPUSP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 DE FEVEREIRO DE 2003

## FICHA CATALOGRÁFICA

BARCELLOS, LUCIANA DE OLIVEIRA

Definição de regras operativas de reservatórios com usos múltiplos: o caso da barragem do Bico da Pedra, 2003.

xvii, 169p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, M.Sc., Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2003)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Programação Dinâmica

2. Análise multicritério

3. Irrigação

4. Múltiplos usos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARCELLOS, L. O. (2003). Definição de regras operativas de reservatórios com usos múltiplos: o caso da barragem do Bico da Pedra. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM-059A/2003, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Luciana de Oliveira Barcellos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Definição de regras operativas de reservatórios com usos múltiplos: o caso da barragem do Bico da Pedra.

GRAU: Mestre

ANO: 2003

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Luciana de Oliveira Barcellos  
SQSW 105 Bloco F ap. 416  
CEP 70.670-426 Brasília – DF - BRASIL

Ao meu marido André  
e aos meus pais

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho não seria possível sem a ajuda incondicional de pessoas às quais tenho o prazer de agradecer.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Professor Oscar de Moraes Cordeiro Netto, pelas inteligentes colocações, pela paciência e pela atenção a mim dispensada durante o trabalho, imprescindível para a melhoria de sua qualidade.

Destacaria também a participação do Professor Néstor Aldo Campana na condição de co-orientador, de primordial importância na realização do trabalho, pela sua total disponibilidade em tirar dúvidas e me apoiar nos momentos difíceis.

Agradeço também a todos os professores do curso de mestrado, professores Sérgio Koide, Cristina Célia Silveira Brandão, Marco Antonio Almeida de Souza, Nabil Joseph Eid, Ricardo Silveira Bernardes, pela dedicação e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas da CODEVASF, em especial Athadeu Silva, Paulo Pires e com muitas saudades ao meu amigo Francisco Barra, que muito contribuíram para a realização do trabalho.

Aos colegas da ANEEL, pela ajuda e disponibilidade, em especial Lídia, Clayton e Wougran. Agradeço também o apoio de Rosângela Lago, sem o qual não seria possível a realização deste projeto.

Aos amigos da ANA, destacando Marcos Airton Freitas pela paciência e conhecimentos transmitidos e Devanir dos Santos pela ajuda primordial na obtenção dos dados para a pesquisa.

A todos os colegas de curso pelo apoio, pela amizade e bons momentos, em especial aos amigos Luzideth, Alexandre, Alan, Raquel e Juliana, por poder compartilhar com eles também os momentos difíceis. Ao amigo Nelson Azambuja pelo empenho na obtenção de dados e ao colega Arisvaldo Mélo pela disponibilidade e ajuda mesmo à distância.

# **DEFINIÇÃO DE REGRAS OPERATIVAS DE RESERVATÓRIOS COM USOS MÚLTIPLOS: O CASO DA BARRAGEM DO BICO DA PEDRA**

## **RESUMO**

A operação de reservatórios com usos múltiplos é bastante complexa, ao se considerar a participação de todos os usuários no processo decisório. Foram feitas, neste trabalho, duas simulações da operação de um reservatório utilizando ferramentas de auxílio à decisão monocritério e multicritério.

A partir da pesquisa das metodologias existentes e de suas aplicações em problemas de recursos hídricos, foram escolhidas para teste duas técnicas: a Programação Dinâmica e o método ELECTRE III.

O estudo de caso escolhido para o teste foi a barragem do Bico da Pedra, localizada no rio Gortuba, em Minas Gerais, a qual abastece a cidade de Janaúba e projetos públicos irrigados da CODEVASF. A razão para isto foi a constatação da existência de conflitos pelo uso da água da barragem, envolvendo irrigantes localizados a jusante e fora dos projetos públicos e a CODEVASF, a qual é atualmente a responsável pela operação da barragem.

Os usuários da barragem foram divididos em oito grupos, cada qual com características semelhantes de exploração das culturas irrigadas. No caso da aplicação da Programação Dinâmica, outros usos como a liberação de volume remanescente, o atendimento da agricultura familiar, o abastecimento humano, dentre outros, foram considerados como restrições ao problema. No caso da análise multicritério, os oito usuários pré-estabelecidos tinham prioridade no abastecimento, com configurações determinadas na escolha das alternativas de alocação da água, as quais levavam também em consideração o volume disponível na barragem no início do período crítico, isto é, de abril a setembro, e a garantia de disponibilidade em todo o período.

Ao final do trabalho, no caso da Programação Dinâmica, foi obtida uma prioridade de atendimento, a qual dependia do benefício líquido de cada usuário, e no caso da aplicação do ELECTRE III, as alternativas foram classificadas de acordo com a ponderação entre sete critérios: dois sociais, dois ambientais e três econômicos.

# **DEFINITION OF OPERATIVE RULES OF RESERVOIRS WITH MULTIPLE USES: THE CASE OF BICO DA PEDRA DAM**

## **ABSTRACT**

A multiple purpose reservoir operation is very complex, if we consider all users taking part of the decision-making process. The monocriterion and multicriterion methods have been used for the two reservoir operational simulations.

As from the already existing research methodologies and its applications in the water resources problems, two techniques were appointed for tests: the Dynamic Programming and the ELECTRE III method.

The elected case study was the Bico da Pedra dam located at the Gortuba river, in the State of Minas Gerais, which supplies the Janaúba city and the CODEVASF irrigation public projects. The reason for this choice was the evidence of existing water conflicts involving irrigators located downstream, and that were not included in the public projects and CODEVASF, which is actually in charge of the dam's operational system.

The dam's users were divided into eight groups, each one of them having similar characteristics on the exploitation of irrigated cultures. Other uses, such as the remaining ecological volume, assistance on domestic agriculture, human water supply, among others, were considered as constraints in the process of the Dynamic Programming application. With reference to the multicriterion analysis, the eight pre-established users had priorities in their water supplies, with determined configuration of allocation in the establishment of water allocation alternatives, considering the dam's availability of volume capacity in the beginning of the crucial period, from April to September, and the guarantee for supply during all period.

A supply priority was established at the end of the project, in the case of Dynamic Programming application, in accordance to the net benefit of each user, and, in the case of the ELECTRE III application, the alternatives were classified in accordance with the ponderation of seven criterion: two socials, two environmental, and three economic ones.

# ÍNDICE

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
3.1. MODELOS MONOCRITÉRIO	6
3.1.1. Programação linear	9
3.1.2. Programação não-linear	12
3.1.3. Programação dinâmica	16
3.2. MODELOS MULTICRITÉRIO	18
3.2.1. Função utilidade ou valor	27
3.2.2. Método analítico hierárquico	28
3.2.3. Métodos da série ELECTRE	29
3.2.4. Promethee	31
3.2.5. Programação de compromisso (“Compromise Programming”)	32
4. MODELOS APLICADOS À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS	34
4.1. MODELOS MONOCRITÉRIO	34
4.1.1. Revisão bibliográfica	34
4.1.2. Escolha de uma técnica e justificativas	43
4.1.3. Descrição do método escolhido	43
4.2. MODELOS MULTICRITÉRIO	45
4.2.1. Revisão bibliográfica	45
4.2.2. Escolha do método e justificativas	51
4.2.3. Descrição do método escolhido	52
5. METODOLOGIA DA PESQUISA	56
6. CASO DE ESTUDO	59
7. TRATAMENTO DOS DADOS HIDROLÓGICOS E DE DEMANDA	69
7.1. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PLUVIOMETRIA	74

7.2. MODELO CHUVA-VAZÃO	75
7.3. BALANÇO HÍDRICO	80
7.4. DISPONIBILIDADE MENSAL	81
8. FORMULAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA	84
9. ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA MULTIOBJETIVO	94
9.1. IDENTIFICAÇÃO DOS INTERESSES DOS ATORES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DECISÓRIO	94
9.2. ESTRUTURAÇÃO DOS CRITÉRIOS	99
9.3. DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS	104
9.4. IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE OS CRITÉRIOS	106
10. RESULTADOS OBTIDOS	110
10.1. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA	110
10.2. RESULTADOS DA ANÁLISE MULTIOBJETIVO	114
11. ANÁLISE DOS RESULTADOS	137
11.1. COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA	137
11.2. COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO ELECTRE III	138
11.2.1. Análise da sensibilidade dos resultados da aplicação do modelo ELECTRE III	143
11.3. AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A APLICAÇÃO DOS MÉTODOS MONOCRITÉRIO E MULTICRITÉRIO	146
12. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	148
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
APÊNDICE	161

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
3.1 - Classificação dos métodos de otimização com relação à existência ou não de restrições ao problema	8
3.2 - Classificação das técnicas de Programação Não-Linear	13
3.3 - Classificação dos métodos multicritério feita por MacCrimmon (1973)	23
3.4 - Classificação de técnicas multicritério segundo Cohon e Marks (1975)	24
3.5 - Classificação dos métodos multicritério segundo Goicoechea <i>et al.</i> (1982)	25
3.6 - Classificação dos métodos multicritério feita por Vincke <i>et al.</i> (1992)	26
3.7 - Adequação dos métodos Electre às problemáticas decisórias de referência	29
4.1 - Aplicações de análise multicritério a problemas de recursos hídricos	46-47
6.1 - Dados técnicos da barragem do Bico da Pedra	61
6.2 - Associações de produtores rurais identificadas no Perímetro Irrigado do Gorutuba	68
7.1 - Vazão média mensal da estação Janaúba (m <sup>3</sup> /s)	69
7.2 - Precipitação média mensal 1970 – 1973 (mm)	70
7.3 - Dados pluviométricos 1988 – 1999 (mm)	72
7.4 - Precipitação média da bacia obtida por meio de Krigagem 1970 – 1973 (mm)	74
7.5 - Precipitação média da bacia obtida por meio de Krigagem 1988 – 1999 (mm)	75
7.6 - Evapotranspiração potencial (mm/mês)	79
7.7 - Série de vazões médias mensais gerada pelo IPH-MEN - 1988-1999 (m <sup>3</sup> /s)	80
7.8 - Simulação das garantias de disponibilidade (1988-1999)	82
8.1 - Principais culturas por usuário – 1999	85
8.2 - Consumo de água por cultura por usuário	86
8.3 - Demanda mensal de água por categoria de usuários	87
8.4 - Benefícios gerados por cultura e por usuários	92
8.5 - Benefícios líquidos obtidos por volume fornecido e por usuário (R\$)	93
9.1 - Critérios de avaliação propostos	100
9.2 - Alternativas de solução	106
10.1 - Demanda dos usuários utilizada na simulação	111
10.2 - Volumes disponíveis utilizados nas simulações	111
10.3 - Resultado da Programação Dinâmica (N.A. = 544m, Garantia = 100%)	112
10.4 - Resultado da Programação Dinâmica (N.A. = 544m, Garantia = 90%)	112
10.5 - Resultado da Programação Dinâmica (N.A. = 544m, Garantia = 70%)	112

10.6 - Resultado da Programação Dinâmica (N.A. = 545m, Garantia = 100%)	113
10.7 - Volume fornecido para cada usuário por alternativa (N.A. inicial = 544m)	115
10.8 - Volume fornecido para cada usuário por alternativa (N.A. inicial = 545m)	116
10.9 - Resumo do volume fornecido por alternativa	117
10.10 - Matriz critérios x alternativas (N.A. inicial = 544m)	118
10.11 - Matriz critérios x alternativas (N.A. inicial = 545m)	119
10.12 - Limiares atribuídos para cada critério (N.A. inicial = 544m)	120
10.13 - Limiares atribuídos para cada critério (N.A. inicial = 545m)	120
10.14 - Notas atribuídas por cada representante dos grupos decisores	122
10.15 - Matriz de credibilidade (N.A. = 544m e Grupo I)	123
10.16 - Matriz de credibilidade (N.A. = 544m e Grupo II)	125
10.17 - Matriz de credibilidade (N.A. = 544m e Grupo IV)	126
10.18 - Matriz de credibilidade (N.A. = 544m e Grupo V)	127
10.19 - Matriz de credibilidade (N.A. = 545m e Grupo I)	129
10.20 - Matriz de credibilidade (N.A. = 545m e Grupo II)	130
10.21 - Matriz de credibilidade (N.A. = 545m e Grupo IV)	131
10.22 - Matriz de credibilidade (N.A. = 545m e Grupo V)	132
10.23 - Matriz de resultados (N.A. = 544m)	134
10.24 - Matriz de resultados (N.A. = 545m)	134
11.1 - Variações nos parâmetros para análise de sensibilidade	143
11.2 - Resultados da variação dos valores dos critérios	144
11.3 - Resultado da variação dos valores dos limiares	145
11.4 - Resultado da variação dos valores dos pesos	146

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figuras</b>	<b>Página</b>
3.1 - Pontos estacionários da função $F(X1)$	14
3.2 - Processo típico de decisão com múltiplos objetivos (adaptado de Chankong e Haimes, 1983)	21
4.1 - Zonas: (a) indiferença; (b) preferência fraca; (c) preferência estrita (adaptado de Simos et al., 1994)	53
4.2 - Relações de preferências (Yu e Roy, 1992 <i>apud</i> Generino, 1999)	54
4.3 - Construção do índice de concordância (Maystre <i>et al.</i> , 1994)	55
4.4 - Construção do índice de discordância (Maystre <i>et al.</i> , 1994)	55
5.1 - Representação esquemática da metodologia	58
6.1 - Mapa da Bacia do Rio Gorutuba	60
6.2 - Evolução das áreas irrigadas (1986 – 1999)	63
6.3 - Localização dos Usuários da Bacia do rio Gorutuba	65
7.1 - Postos pluviométricos 1970-1973	71
7.2 - Postos pluviométricos 1988-1999	73
7.3 - Gráfico comparativo de vazões	81
7.4 - Gráfico Cota Inicial do Reservatório x Disponibilidade	83
9.1 - Escala de avaliação do critério garantia de disponibilidade	103
9.2 - Questionário de avaliação de prioridades	109
10.1 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m e Grupo I)	124
10.2 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m e Grupo II)	125
10.3 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m e Grupo IV)	127
10.4 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m e Grupo V)	128
10.5 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m e Grupo I)	129
10.6 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m e Grupo II)	131
10.7 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m e Grupo IV)	132
10.8 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m e Grupo V)	133
10.9 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m)	135
10.10 - Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m)	136

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_i$	Conjunto de pesos atribuídos pelos decisores
$\alpha, \beta$ e $\gamma$	Problemáticas decisórias de referência
$\lambda$	Multiplicadores de lagrange
$\pi(a, b)$	Índice de preferência global
$\alpha_i$	Pesos associados a cada critério
$\varphi^+(a)$	Fluxo de importância positivo
$\varphi^-(a)$	Fluxo de importância negativo
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\alpha$	Coefficiente da equação de infiltração
A	Área do espelho d'água
a	Parâmetro no modelo IPH-MEN
a, b	Alternativas
a P b	a é preferível a b
a I b	a é indiferente a b
b	Parâmetro no modelo IPH-MEN
$B_i$	Benefício gerado pelo fornecimento de água para o usuário "i";
$b_t$	Parâmetro de decisão a ser determinado na formulação das RDL
$b_i X_i$	Benefício total do usuário i
$B_n$	Benefício líquido da cultura n
c	Parâmetro no modelo IPH-MEN
$C_i(a, b)$	Coefficiente de concordância
$C_n$	Consumo de água da cultura n
$D_i(a, b)$	Coefficiente de discordância
E	Evaporação do espelho d'água
$E(t)$	Evaporação
ETP	Evapotranspiração potencial
$F(X)$	Função com variáveis contínuas
$f_i(x)$	Função-objetivo para o critério i
$f_i^{**}$	Vetor dos piores valores na matriz de avaliação
$f_i^*$	Melhores valores no conjunto finito dos $f_i(x)$
$f_{OBJ}$	Função-objetivo

$F_c$	Fator de correção em função da latitude e mês do ano
$f_n^*(S_n)$	Função recursiva
$f_n(S_n, X_n)$	Função do estado e da variável de decisão
$f_n(S_n, X_n^*)$	Função recursiva relacionando o estado com a decisão ótima
$g_i(X)$	Função de restrição
$H(x)$	Função de preferência
ha	Hectares
$I(t)$	Infiltração
$I_b$	Capacidade de infiltração quando o solo está saturado
$I_0$	Capacidade de infiltração do solo quando a umidade é $S_0$
km	Quilômetro
$K$	Parâmetro que caracteriza o decaimento da curva exponencial de infiltração
$K_b$	Coefficiente de propagação subterrânea
$K_s$	Coefficiente de propagação superficial
$L(X, \lambda)$	Lagrangiano
$L_S(x)$	Medida de proximidade
mm	Milímetro
m	Metro
$m^3$	Metro cúbico
$P$	Precipitação sobre o espelho d'água
$P_n$	Percentual da cultura n
$P(a,b)$	Índice de preferência
$p_i$	Limiar de preferência
$P_i$	Parcela da precipitação que infiltra
$Q_{7,10}$	Vazão mínima de sete dias consecutivos com dez anos de tempo de retorno
$Q_a$	Vazão afluyente ao reservatório
$Q_e$	Vazão efluente do reservatório
$q_i$	Limiar de indiferença
$Q_s(t+1)$	Escoamento superficial no instante t+1
$Q_s(t)$	Escoamento superficial no instante t
$Q_b(t+1)$	Escoamento subterrâneo no instante t+1
$Q_b(t)$	Escoamento subterrâneo no instante t

$Q_o$	Vazão observada
$Q_c$	Vazão calculada
$Q_m$	Média da série de vazões observadas
$R_t$	Vazão efluente durante o período t na formulação das RDL
$r$	Parâmetro no modelo IPH-MEN
R\$	Reais
$R^2$	Coefficiente de Nash
$s$	Segundo
$S(t+1)$	Armazenamento no final da simulação
$S(t)$	Volume inicial do reservatório
$S_{t-1}$	Volume armazenado no final do período t-1 na formulação das RDL
$S$	Importância que o decisor atribui aos desvios máximos
$S_i$	Estado no estágio i
$S_{i+1}$	Estado no estágio seguinte i+1
$S_{max}$	Capacidade máxima de percolação
$S(t)$	Armazenamento de água na camada superior do solo
$T(t)$	Percolação
$t$	tempo
$T$	Temperatura média do ar
$v_i$	Limiar de veto
$V_p$	Volume precipitado
$V_E$	Volume evaporado
$V_a$	Volume afluente ao reservatório
$V_e$	Volume efluente ao reservatório
$V_d$	Volume mensal disponível para alocação entre os oito usuários
$V_T$	Volume mensal disponível total
$V_S$	Parcela da precipitação que escoar
$X^*$	Pontos estacionários
$x$	Vetor de decisões
$X$	Conjunto de soluções viáveis
$X_n^*$	Valor que minimiza ou maximiza a função recursiva
$X_i$	Demanda de água de cada usuário “i”
$X_n$	Volume de água mensal requerida por cultura

## LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ARS	Adaptative Random Search
ANA	Agência Nacional de Águas
ASSIEG	Associação dos Irrigantes da Margem Esquerda do rio Gorutuba
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco
CODEMA	Conselho Municipal de Desenvolvimento Ambiental
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
COVAG	Cooperativa do Vale do Gorutuba
CEIVERDE	Comitê de Gestão dos Recursos Hídricos da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
DIG	Distrito de Irrigação do Gorutuba
ELECTRE	Elimination and (Et) Choice Translating Reality
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INPAMA	Instituto Nacional de Proteção ao Meio Ambiente
N.A.	Nível d'água
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não-Linear
PD	Programação Dinâmica
PDI	Programação Dinâmica Incremental
PDDD	Programação Dinâmica Diferencial Discreta
PDIAS	Programação Dinâmica Incremental com Aproximações Sucessivas
PDGR	Programação Dinâmica com Garantias Restritas
PDPR	Programação Dinâmica com Probabilidades Restritas
PROMETHEE	Preference Ranking Organization
PDEA	Programação Dinâmica Estocástica Amostra
PDEB	Programação Dinâmica Estocástica Bayesiana
PDE	Programação Dinâmica Estocástica

PDMO	Programação Dinâmica com Múltiplos Objetivos do Parnaíba
RDL	Regras de Decisão Lineares
PLANTEC	Planejamento e Tecnologia Agrícola Ltda.
SEEIVERDE	Subcomitê Executivo de Estudos Integrados da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande
URS	Uniform Random Search

# 1. INTRODUÇÃO

Apesar da aparente abundância de água no nosso planeta, pouco mais de 2% do seu volume são passíveis de serem utilizados pelos seres humanos. Em termos médios, os recursos hídricos ainda são abundantes, no entanto a sua má distribuição espacial e temporal leva à escassez em determinados locais e à abundância em outros, causando graves problemas como secas prolongadas e enchentes que prejudicam o desenvolvimento econômico e social das sociedades afetadas.

Quando a distribuição espacial da água não é adequada às demandas dos centros de consumo, uma das soluções está na procura de água em outros locais. Do contrário, quando o problema é excesso, a solução pode estar na construção de estruturas de drenagem ou armazenamento. Portanto, como bem expressa Lanna (1997), “em todas as situações o padrão espacial de disponibilidade de água é alterado para adequá-lo ao padrão espacial das demandas”.

Em relação à distribuição temporal, mesmo em locais em que as disponibilidades são suficientes para atender às demandas, podem ocorrer períodos de carência ou excesso de água. Nesses casos, a solução pode estar na busca de fontes hídricas a serem utilizadas nos períodos de escassez ou na criação de reservatórios (Lanna, 1997).

A utilização dos recursos hídricos deve basear-se no princípio dos usos múltiplos, segundo o qual esses recursos devem estar disponíveis, com igualdade de oportunidade, para todas as categorias de usuários eficientes interessados. Para tanto, são necessários instrumentos de planejamento e gestão adequados que visem a evitar conflitos na disputa pela água (Garrido, 1999). Portanto, a alocação de tais recursos entre usos múltiplos é problema bastante complexo, cuja solução pode ser procurada com técnicas de análise de sistemas.

O processo de gerenciamento de recursos hídricos no Brasil visava, inicialmente, ao atendimento de demandas específicas, com ênfase no setor de energia elétrica e, em um segundo momento, no abastecimento de água dos centros urbanos. Esse modelo contribuiu para uma distribuição desigual da infra-estrutura de recursos hídricos no país, e a falta de um gerenciamento intersetorial vem provocando conflitos entre usuários competindo pela mesma água (Azevedo e Baltar, 1997). De acordo com Coimbra *et al.* (1999), “esses conflitos tendem

a comprometer o desenvolvimento sustentável e o progresso de uma forma geral, uma vez que resultam em perda de eficácia para vultosos investimentos públicos e privados e em prejuízos para os usuários menos estruturados do ponto de vista político-institucional”.

A gestão dos recursos hídricos apresenta interfaces de interesse com a gestão de outros recursos naturais e com atividades setoriais como a saúde pública, educação, irrigação, indústrias, geração de energia, drenagem urbana, navegação, entre outras. No entanto, existe prioridade de uso, em situações de escassez, para o consumo humano e a dessedentação de animais, estabelecida pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.

O abastecimento urbano de água é constituído pelo uso doméstico e outros usos referentes às atividades que se associam ao núcleo urbano, tais como, indústria, comércio, prestação de serviços, públicos e privados.

A água é utilizada na indústria como insumo no processo produtivo, como meio de refrigeração ou como veículo de arraste de resíduos. Não há atividade industrial sem garantia de acesso à água (Muñoz, 1997). Existem atividades industriais altamente consumidoras de água e outras com pequena demanda. Geralmente, as indústrias grandes consumidoras possuem captações próprias de água, enquanto as outras são abastecidas por redes públicas ou poços profundos.

Conforme frisam Coimbra *et al.* (1999), a irrigação é a solução para o problema da má distribuição das chuvas, diminuindo o risco dos investimentos agrícolas e aumentando a produção e a produtividade. Porém, a prática da irrigação pode ocasionar efeitos adversos como a salinização dos solos e o desperdício de água, se não for adequadamente controlada.

Segundo Borella (1994), a irrigação é o maior consumidor de água dentre os usos consutivos, utilizando cerca de 70 % de toda a água consumida no Brasil. Com isso, surgem conflitos entre usuários da água de diversos setores como abastecimento, produção de energia, dentre outros. Além dos conflitos entre setores usuários, existem os conflitos entre irrigantes, os quais ocorrem devido ao crescimento descontrolado de áreas irrigadas, causando disputa pelo uso da água, que nem sempre existe em quantidade necessária para atender à demanda existente.

As técnicas utilizadas na irrigação têm evoluído bastante no Brasil e a otimização no uso dessas técnicas contribui, em muito, para a economia de água e energia. Portanto, é fundamental a conscientização dos irrigantes para investimentos nessas técnicas que trarão benefícios financeiros, sociais e ambientais, além da diminuição dos conflitos resultantes da competição pela água (Pagnoccheschi, 2000).

A construção de represas é feita considerando-se investimentos estratégicos de longo prazo que podem gerar múltiplos benefícios com a finalidade de atendimento das necessidades de água de certas regiões. Alguns objetivos específicos da implantação de barragens são o desenvolvimento regional, a geração de empregos e o apoio à exportação de produtos industriais e agrícolas, resultando na geração de renda advinda dessa atividade. Segundo o WCD (2000), cerca de 30% a 40% de todos os hectares irrigados do planeta dependem de barragens que, portanto, desempenham um importante papel no desenvolvimento da agricultura irrigada.

A operação de reservatórios que atendem a múltiplos usos é uma atividade bastante complexa, pois envolve decisões de diversos atores os quais, muitas vezes, possuem pontos de vista conflitantes. Com vistas a resolver esse problema surgiram diversas técnicas, cada vez mais elaboradas, para auxiliar na busca da política ótima de operação que atenda a maioria dos usuários da água. A análise de sistemas relacionada com a operação de reservatórios utiliza-se de modelos de otimização e simulação e de técnicas de pesquisa operacional para obtenção de bases confiáveis para a tomada de decisão.

O presente trabalho leva em consideração o uso múltiplo da água no planejamento operacional de reservatórios, utilizando-se de ferramentas de otimização monocritério, além de técnicas multicritério. Foram estudadas técnicas passíveis de serem utilizadas quando se busca uma alocação mais eficiente da água estocada. Como referência para aplicação das técnicas e como caso de estudo para teste das técnicas selecionadas, foi utilizada a Barragem do Bico da Pedra, no estado de Minas Gerais.

O trabalho está estruturado em doze capítulos, dos quais os dois primeiros fazem uma introdução da problemática da disponibilidade de água para usos múltiplos e descrevem os objetivos da pesquisa. No terceiro capítulo, é apresentado levantamento de técnicas de otimização existentes e suas variações. A escolha das técnicas a serem utilizadas foi feita,

como descrito no quarto capítulo, com base na revisão da bibliografia existente sobre o assunto, com identificação das referências que procuraram fazer uma classificação dessas técnicas, segundo suas características.

Após a escolha das técnicas a serem aplicadas, é apresentada a abordagem metodológica para o trabalho, descrita no quinto capítulo.

No sexto capítulo, para permitir a aplicação das técnicas escolhidas a um caso prático, é descrita uma pesquisa das características da bacia do rio Gorutuba, onde se encontra a Barragem do Bico da Pedra, tais como a configuração produtiva da bacia, usuários da água, culturas predominantes, benefícios dessas culturas, etc.

No sétimo capítulo, são descritos os procedimentos utilizados para o tratamento dos dados hidrológicos, que permitiram a determinação da disponibilidade de água por meio da simulação da operação do reservatório, para níveis de garantia de disponibilidade. Com base nos dados hidrológicos e de disponibilidade, foi proposta a estruturação do problema para a aplicação das técnicas de análise monocritério e multicritério, descritas no oitavo e nono capítulos, respectivamente.

Os resultados obtidos com a aplicação das duas técnicas de otimização foram transcritos no décimo capítulo e, posteriormente, no capítulo décimo primeiro, é apresentada uma análise de sensibilidade desses resultados para testar a robustez da abordagem, no caso da análise multicritério. O último capítulo foi dedicado às conclusões do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

A avaliação da aplicabilidade de técnicas de auxílio à decisão feita neste trabalho poderá servir para embasar a eventual adoção de uma dessas técnicas no âmbito de comitês de bacia.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é **avaliar procedimentos para a definição de regras de alocação da água de um reservatório de regularização, a partir da utilização de técnicas de otimização monocritério e da adoção de abordagens multicritério.**

No âmbito desse objetivo geral, consideraram-se alguns objetivos específicos, quais sejam:

- Estudar o comportamento hidrológico e a gestão de um reservatório, por meio do desenvolvimento de um modelo de balanço hídrico;
- Estudar a aplicabilidade das técnicas de otimização ao caso em estudo;
- Propor critérios de alocação da água por meio de consulta aos usuários interessados;
- Testar ferramentas de suporte à decisão para definição de alternativas de alocação de água envolvendo usos conflitantes;
- Avaliar a aplicação de técnicas que visem à consideração de outros critérios, além do técnico e do econômico-financeiro, na tomada de decisão para o caso em estudo; e
- Analisar, a partir dos resultados obtidos, as diferenças existentes entre as técnicas aplicadas e avaliar, se possível, qual a aplicabilidade de cada uma delas ao caso em questão.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Este trabalho envolve a pesquisa e aplicação de técnicas de auxílio à decisão para selecionar estratégias de operação de reservatórios de múltiplos usos. Foi feito um levantamento de alternativas metodológicas existentes na literatura, com uma descrição sucinta daquelas pesquisadas, visando à seleção das mais adaptáveis para tratar o problema em questão.

Os modelos de suporte ou auxílio à decisão podem levar em consideração um único critério na tomada de decisão, que são os chamados modelos monocritério, ou analisar o problema considerando diferentes critérios para a escolha da solução ótima, que são os denominados modelos multicritério.

#### **3.1. MODELOS MONOCRITÉRIO**

Os modelos usados na análise de sistemas de recursos hídricos podem, a princípio, ter dois propósitos distintos ao representarem um sistema: simular a realidade ou buscar uma solução possível para um problema apresentado. Resultam desses propósitos os modelos de simulação e de otimização.

##### *Simulação*

O modelo de simulação tem o objetivo de descrever o funcionamento real de um sistema no espaço ou no tempo. Com a aplicação desses modelos, não é obtida a solução ótima para o problema e, sim, um conhecimento de como o sistema funciona. Alguns exemplos de modelos de simulação são a equação de balanço hídrico de um reservatório e os modelos de chuva-vazão.

O balanço hídrico de um reservatório é obtido a partir do conhecimento de variáveis do sistema, isto é, de variáveis de entrada e de saída. O volume do reservatório aumenta com a precipitação sobre o espelho d'água [ $P(\text{mm})$ ] e a vazão afluyente ao reservatório [ $Q_a (\text{m}^3/\text{s})$ ], e diminui com a evaporação do espelho d'água [ $E(\text{mm})$ ] e a vazão efluente do reservatório [ $Q_e (\text{m}^3/\text{s})$ ]. A equação do balanço hídrico calcula o armazenamento no reservatório no final do intervalo de simulação [ $S(t+1)$ ] a partir de um volume inicial do reservatório  $S(t)$ . A equação do balanço hídrico é a seguinte:

$$S(t+1) = S(t) + P + Q_a - E - Q_e \quad (3.1)$$

Todos os componentes da equação acima expressos em unidades de volume.

Outro exemplo de simulação são os modelos de precipitação-vazão. Esse tipo de modelo tem o objetivo de representar parte do ciclo hidrológico, definindo vazão como variável dependente da precipitação. Esses modelos surgiram da necessidade da obtenção de séries de vazões mais longas e representativas, devido à falta de dados históricos medidos. De posse de uma série de precipitações, é possível, assim, a obtenção de uma estimativa das vazões desconhecidas ou, mesmo, estimá-las para novos cenários das bacias.

Os dados de entrada desse tipo de modelo são geralmente a precipitação e a evapotranspiração potencial. Nesses modelos, existem parâmetros que representam as características físicas da bacia e alguns deles possuem módulos de otimização para o ajuste desses parâmetros. Após a obtenção dos parâmetros otimizados e tendo-se uma série de precipitações e evapotranspirações, pode-se obter uma série de vazões estimada para o mesmo período.

### *Otimização*

Segundo Beale (1988), otimizar significa encontrar matematicamente a melhor solução para um problema, ou seja, maximizar ou minimizar uma função com  $n$  variáveis, onde  $n$  pode ser qualquer número inteiro maior do que zero. A função que estabelece formas de valoração dos resultados do processo decisório representado é chamada de função-objetivo. Essa função pode ou não estar sujeita a restrições que expressem as limitações físicas ou de recursos da situação analisada. As restrições mais frequentemente identificadas em operação de reservatórios são as equações de continuidade, armazenamento máximo e mínimo, vazões liberadas máximas e mínimas, limitações de equipamentos e obrigações legais, contratuais e institucionais correspondentes aos vários usos do reservatório (Yeh, 1985).

De acordo com Yeh (1985), a escolha do método de otimização depende das características do reservatório a ser estudado, da disponibilidade de dados e dos objetivos e restrições consideradas. Uma classificação dos métodos de otimização foi feita levando-se em

consideração a existência ou não de restrições ao problema, como mostrado na tabela 3.1, a seguir.

Os métodos iterativos baseiam-se na busca do mínimo ou máximo da função por meio de um processo direcionado de tentativa. Segundo Tucci (1998), os métodos iterativos possuem quatro características básicas, que são a *definição do ponto de partida*, isto é, do valor inicial das variáveis a serem otimizadas; a escolha de uma *direção de busca* a qual identifica o vetor no qual as variáveis serão alteradas; a adoção do *espaçamento de cada tentativa*, isto é, a variação na direção da pesquisa em cada tentativa; e a definição do *critério de parada* que consiste na definição dos critérios de aceitação da solução encontrada como solução ótima para o problema. Existem alguns métodos que são representativos dessa classe de métodos iterativos que são o método univariacional e o método da rotação das coordenadas ou método de Rosenbrock.

Tabela 3.1 - Classificação dos métodos de otimização com relação à existência ou não de restrições ao problema

Otimização sem restrições	Otimização com restrições
<i>Técnicas iterativas</i>	<i>Programação linear</i>
Método univariacional	<i>Programação não-linear</i>
Método da rotação das coordenadas	<i>Programação dinâmica</i>
<i>Técnicas de otimização global</i>	
Métodos aleatórios	
Métodos baseados em algoritmos genéticos	

Fonte: Beale (1988)

A aplicação de técnicas iterativas não garante a obtenção de um mínimo ou máximo global. Para se obter uma aproximação do ótimo global por meio da aplicação de técnicas iterativas, têm-se duas alternativas. A primeira é a aplicação de otimizações sucessivas, variando-se o ponto de partida e adotando-se como mínimo global o menor resultado dessas tentativas. A segunda alternativa é a aplicação de métodos iterativos diferentes, um após o outro, não garantindo, porém, a obtenção de um mínimo global.

Algumas técnicas de otimização global utilizadas são as técnicas aleatórias de pesquisa e algoritmos genéticos. Os métodos aleatórios utilizam o conceito de probabilidade para a amostragem aleatória. Alguns exemplos desse tipo de método são a *Pesquisa Uniforme Aleatória* (URS – Uniform Random Search) e a *Pesquisa Aleatória com Adaptação* (ARS – Adaptive Random Search).

### 3.1.1. Programação linear

A Programação Linear (PL) é um caso particular do modelo geral de otimização, em que a função objetivo e as restrições são equações lineares. Dentre as técnicas de otimização, é a que tem sido mais utilizada, além de ser a que mais se desenvolveu. A PL foi criada em 1947 por G. B. Dantzig com a finalidade de resolver problemas de logística da Força Aérea Americana.

A PL é atualmente utilizada em diversos setores da sociedade, como agricultura, indústria, transportes, dentre outros, e sua aplicação mais comum é na alocação ótima de recursos escassos entre atividades concorrentes.

No caso de um problema real, geralmente, existe mais de duas variáveis de decisão e, portanto, o método gráfico por otimização tem uma aplicação bastante limitada em casos práticos. Para os problemas que contêm mais de duas variáveis, é aplicado o método Simplex, desenvolvido por George Dantzig em 1963, e suas variações, tais como o Simplex revisado, o Simplex dual, etc.

Na Programação Linear, existe a opção de se trabalhar com uma formulação alternativa para o mesmo problema, que fornece o mesmo valor para a função-objetivo, chamado de problema *dual*. A aplicação do problema *dual* permite ao analista do sistema realizar a análise de sensibilidade das soluções por meio dos conceitos de preço-sombra e custo de oportunidade. Segundo Barbosa (1997a), com a aplicação do problema *dual*, pode-se fazer uma avaliação da utilidade de cada recurso do problema *primal* que contribuem para o aumento ou a diminuição da função objetivo.

Existem alguns casos especiais como o de programação não-linear e programação inteira em que o modelo de PL é aplicado. A aplicação da Programação Linear Inteira ocorre quando as

variáveis de decisão do problema não são contínuas. Uma das maneiras de se resolver esse problema é aplicar os métodos desenvolvidos para variáveis contínuas e aproximar a solução para o inteiro mais próximo. Esse método não é seguro, podendo chegar a soluções fora do ótimo.

A programação quadrática é aplicada quando a função objetivo é uma forma quadrática e as restrições são lineares. Algoritmos especiais têm sido desenvolvidos, como, por exemplo, o proposto por Wolfe em 1959, que consiste em um algoritmo simplex com algumas modificações.

No caso de gestão de reservatórios, a utilização da PL determinística é feita considerando-se a vazão afluente ao reservatório como sendo a média de um período típico ou a observada em um período histórico crítico. Porém, os parâmetros de modelos hidrológicos são incertos e, portanto, mesmo com a realização de uma análise de sensibilidade, as incertezas não são explicitamente consideradas e os resultados não serão satisfatórios. Existem diversas metodologias que consideram parâmetros, como vazão afluente, por exemplo, que são não determinísticos. Essas metodologias são variações da PL estocástica básica.

A PL estocástica pode ser aplicada em um processo Markoviano, que, no caso de operação de reservatórios, a vazão afluente ou o volume inicial são considerados variáveis de estado. A vazão liberada na operação do reservatório em cada período é a variável de decisão e a transição de um estado para outro é feita em sucessivos períodos de tempo. Outra metodologia existente é a Programação Estocástica com Recurso, na qual o problema é dividido em, no mínimo, dois estágios, e uma ação corretiva pode ser tomada em estágios mais avançados. De acordo com Yeh (1985), em geral, a aplicação de programação linear com recurso é facilitada se as variáveis aleatórias forem discretas, com distribuições uniformes, normais, ou uma distribuição de Erlang.

Outra alternativa para a programação linear estocástica é a chamada Programação Linear com Probabilidades Restritas, proposta por ReVelle *et al.* (1969) *apud* Yeh (1985), em que algumas restrições são formadas por funções de distribuição de probabilidades. Segundo Yeh (1985), o maior desafio das tomadas de decisão com um certo nível de incerteza é derivar de um programa estocástico um equivalente determinístico. Portanto, a capacidade intrínseca da Programação Linear com Probabilidades Restritas de incorporar a estocasticidade das vazões

afluentes ao reservatório na programação linear é uma vantagem em relação à aplicação de modelos estocásticos.

As Regras de Decisão Lineares (RDL) são aquelas que relacionam os parâmetros de armazenamento, decisão e fluxo afluente, e são cruciais na aplicação da PL com Probabilidades Restritas para operação de reservatórios. A aplicação de RDL permite a utilização de algoritmos de programação linear para resolver problemas que seriam não lineares e estocásticos. A formulação original da RDL para operação de reservatórios, proposta por ReVelle *et al.* (1969) *apud* Yeh (1985), é a seguinte:

$$R_t = S_{t-1} - b_t \quad (3.2)$$

onde,

$R_t$  – vazão efluente durante o período  $t$ ;

$S_{t-1}$  – volume armazenado no final do período  $t-1$ ;

$b_t$  – parâmetro de decisão a ser determinado.

Os métodos tradicionais têm como objetivo maximizar o lucro para uma certa capacidade do reservatório ou vice e versa. A formulação de RDL procura um projeto ótimo e uma política de operação associada, a qual, para um certo nível de confiança, satisfaz simultaneamente diversos objetivos complementares ou conflitantes. Esses objetivos podem fazer parte da função objetivo ou das restrições.

Segundo ReVelle *et al.* (1969) *apud* Yeh (1985), a vantagem na implementação dessa regra é que a vazão liberada é determinada no começo de cada período e ela elimina as dificuldades matemáticas na formulação de restrições probabilísticas. As limitações na aplicação dessa regra são que esta resulta em resultados conservativos, os quais superestimam o volume do reservatório, isto porque a regra não consegue determinar o comportamento estocástico do fluxo e, portanto, representa mais uma restrição ao problema (Loucks e Dorfman, 1975). Segundo Loucks e Dorfman (1975), outra desvantagem da aplicação de RDL é a redução considerável do número de políticas operacionais possíveis de serem consideradas, não tendo garantias da obtenção do ótimo.

### **3.1.2. Programação não-linear**

A Programação Não-Linear (PNL) é aplicada a problemas em que a função-objetivo, ou as restrições, ou ambas, são não-lineares. Os modelos de otimização, geralmente, são representados por funções econômicas na função-objetivo e nas restrições, as quais são não-lineares e, portanto, as técnicas de PNL podem ser aplicadas. Diversos métodos foram desenvolvidos para a resolução de problemas não-lineares, porém o sucesso na sua aplicação depende da estrutura do problema a ser analisado e do grau de não-linearidade (Beale, 1988).

As técnicas de PNL tiveram um grande desenvolvimento nas últimas décadas, devido principalmente, à evolução dos computadores. Antes disso, a técnica de otimização utilizada era a Programação Linear, mas a partir da década de setenta a PNL vem sendo cada vez mais utilizada e pesquisada. Porém, devido ao fato de que a sua aplicação necessita de grande capacidade computacional e mais tempo, se comparada com outras técnicas, além do que a estocasticidade das vazões afluentes não pode ser facilmente considerada, a PNL ainda é pouco utilizada nos problemas que envolvem recursos hídricos. Os problemas de PNL foram classificados por Cirilo (1997) de acordo com a técnica utilizada, como mostra a tabela 3.2.

As técnicas analíticas são muito comuns e de fácil assimilação e são abordadas resumidamente neste texto. Existe um número muito grande de técnicas de busca numérica, porém somente as técnicas de PNL com restrições são aplicáveis para o estudo de caso a ser desenvolvido. Serão analisados a seguir dois métodos de PNL com restrições que são: o método das aproximações lineares e o método das funções de penalidade.

Tabela 3.2 - Classificação das técnicas de Programação Não-Linear

Técnicas Analíticas
Método de cálculo diferencial
Método dos multiplicadores de Lagrange
Programação Geométrica
Técnicas de Busca Numérica
<i>Métodos de busca unidimensional</i>
Método de Fibonacci
Método de busca do meio termo
Método DSC-Powell
<i>Métodos de PNL sem restrições com direções de busca a partir de derivadas</i>
Método de Newton-Raphson
Método do maior gradiente
Método dos gradientes conjugados
Métodos Quase-Newtonianos e outros algoritmos
<i>Métodos de PNL sem restrições com busca sem derivadas</i>
Método de Hooke e Jeeves
Método de Rosenbrock
Método de Powell
<i>Métodos de PNL com restrições</i>
Método das aproximações lineares
Método das funções de penalidade

Fonte: Cirilo (1997)

### *Método de Cálculo diferencial*

A otimização de funções objetivo sem restrições que possuem variáveis contínuas é feita por meio de cálculo diferencial. Dada uma função  $F(X)$ , onde  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , para que exista um ponto de mínimo ou máximo deve ser satisfeita a seguinte condição:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

A função objetivo com apenas uma variável pode possuir pontos de mínimo, máximo ou de inflexão, os quais são denominados pontos estacionários, como é ilustrado na figura 3.1., a seguir.

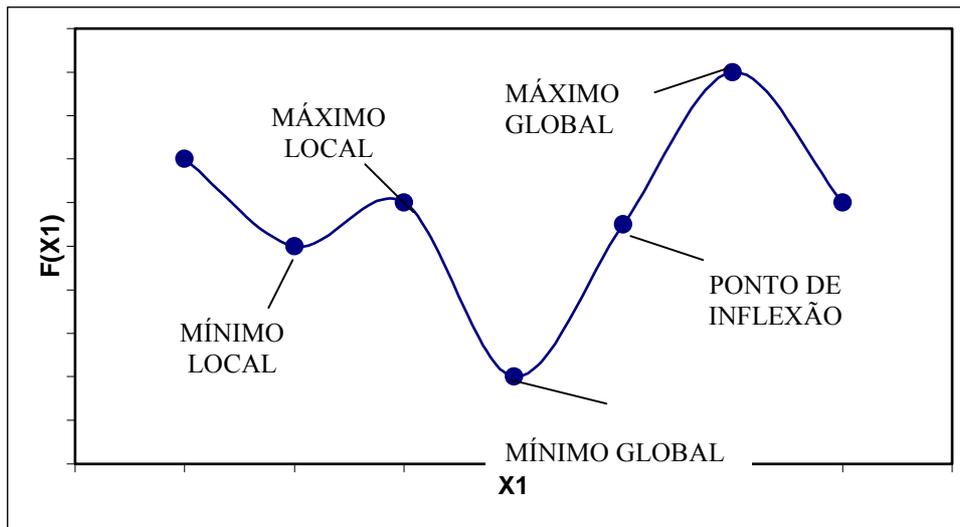


Figura 3.1 - Pontos estacionários da função F(X1)

Um ponto estacionário é considerado mínimo quando os menores principais da matriz Hessiana são maiores do que zero. A condição para que o ponto seja máximo é que os menores principais da matriz Hessiana sejam menores do que zero para todos os ímpares e maiores do que zero para todos os pares. No caso em que nenhuma dessas condições tenha sido satisfeita, o ponto é considerado um ponto de inflexão.

### *Método dos multiplicadores de Lagrange*

O método dos multiplicadores de Lagrange é utilizado para problemas não-lineares com restrições de igualdade. Seja o seguinte problema de otimização:

$$\text{Min } F(X) \tag{3.4}$$

Sujeito a:

$$g_i(X) = 0; i = 1, 2, \dots, m$$

As condições para que  $X^*$  seja um ponto estacionário são obtidas a partir do Lagrangiano, dado por:

$$L(X, \lambda) = f(X) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot g_i(X) \tag{3.5}$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial X} \right|_{X = X^*} = 0 \quad (3.6)$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \lambda} \right|_{\lambda = \lambda^*} = 0 \quad (3.7)$$

Os pontos estacionários  $X^*$  e os multiplicadores de Lagrange  $\lambda$  são obtidos por meio da resolução do sistema de equações formado pelas condições (6) e (7).

### *Método das aproximações lineares*

Esse método foi desenvolvido por Griffith e Stewart (1961) *apud* Cirilo (1997), e baseia-se na expansão de funções em séries de Taylor. Ele consiste em solucionar, por Programação Linear, sucessivos sistemas lineares de acordo com a seguinte estrutura:

$$\text{minimizar } f(X) - f(X^{(K)}) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f(X^{(K)})}{\partial x_j} \Delta x_j^{(K)} \quad (3.8)$$

sujeito a :

$$\sum_{j=1}^n \frac{\partial h_i(X^{(K)})}{\partial x_j} \Delta x_j^{(K)} = -h_i(X^{(K)}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.9)$$

$$\sum_{j=1}^n \frac{\partial g_i(X^{(K)})}{\partial x_j} \Delta x_j^{(K)} \geq -g_i(X^{(K)}) \quad i = m+1, m+2, \dots, p \quad (3.10)$$

A solução do problema é obtida a partir da estimativa de  $X^{(0)}$ , o qual deve ser uma solução viável. O procedimento é repetido até que haja convergência.

### *Método das funções de penalidade*

Esse método é baseado na inserção de restrições na função-objetivo. Portanto, o problema de otimização é do tipo:

$$\text{Maximizar } f(X) \quad X \in E^n \quad (3.11)$$

Sujeito a  $g_i(X)=0$   $i = 1,2,\dots,m$

que pode ser transformado em:

$$\text{Maximizar } Z^* = f(X) - \sum_{i=1}^n p_i \cdot g_i^2(X) \quad (3.12)$$

onde  $p_i$  são constantes denominadas coeficientes de penalidade.

### 3.1.3. Programação dinâmica

A Programação Dinâmica (PD) é aplicada quando se têm problemas que podem ser vistos como processos de decisão sequencial em vários estágios. Esses estágios podem ser intervalos de tempo, seqüências espaciais, seqüências de atividades, etc. De acordo com Barros (1997), “o termo “dinâmica” não é adequado, pois fornece uma idéia errônea do campo de aplicação da técnica, limitando-a, aparentemente, a problemas associados ao tempo”.

Segundo Barros (1997), a solução de problemas de decisão sequencial é feita pela aplicação da Programação Dinâmica da seguinte maneira:

- divide-se o problema geral em estágios;
- determina-se o ótimo em cada estágio;
- relaciona-se o ótimo de um estágio a outro por meio de uma função recursiva;
- percorrem-se todos os estágios para determinar o ótimo global.

A idéia básica da PD é separar o problema inicial em problemas mais simples, simplificando o processo de resolução. Para cada novo problema, determina-se a solução ótima a partir dos resultados ótimos obtidos anteriormente. A solução ótima pode ser obtida em dois sentidos, partindo-se do estágio inicial para o final ou vice e versa. No primeiro caso, a PD é denominada de regressiva e, no outro, de progressiva. Em alguns casos, pode-se optar pelas duas formas de resolução, porém, em outros, como a PD estocástica, o emprego da técnica regressiva é obrigatório (Barros, 1997). A aplicação da PD regressiva é vantajosa quando um problema determinístico tem de ser resolvido várias vezes, com diferentes horizontes de planejamento (Yeh, 1985).

A programação dinâmica pode admitir que a seqüência de eventos futuros seja conhecida, no caso da PD determinística, ou pode considerar os aspectos probabilísticos e estocásticos, no caso da PD estocástica. A PD determinística tem a vantagem de poder representar o sistema de recursos hídricos de forma relativamente detalhada com eficiência computacional. Porém, sua aplicação pode levar a considerar um problema probabilístico como determinístico, levando a hipóteses sobre o futuro que nem sempre podem ocorrer.

Algumas metodologias foram criadas a partir da formulação inicial da PD. Uma delas é chamada de PD Incremental (PDI) e PD Diferencial Discreta (PDDD), que utilizam o conceito de incremento para as variáveis de estado. A diferença entre as duas abordagens é somente que a PDDD é uma generalização da PDI. Essas metodologias funcionam como métodos iterativos associados à PD em que é escolhida uma trajetória inicial e a equação recursiva da PD é utilizada nos estados vizinhos que são acima e abaixo da trajetória escolhida. Se uma trajetória vizinha produz um melhor valor para a função-objetivo, então essa nova trajetória é adotada. Esse procedimento continua até que se atinja a convergência. Essas metodologias melhoram o problema da dimensionalidade e o tempo necessário para o processamento do modelo é drasticamente reduzido (Yeh, 1985).

Yeh (1985) cita também uma metodologia denominada PD Incremental com Aproximações Sucessivas (PDIAS), na qual é feita uma decomposição do problema com múltiplos estados (cada um com uma variável), em uma série de sub-problemas com uma única variável de estado, e a seqüência de otimizações feitas nos subproblemas convergem para a solução do problema original. A vantagem dessa metodologia é o tratamento de um problema  $x$ -dimensional resolvendo-se uma série de problemas unidimensionais, reduzindo assim o requerimento computacional.

Outro tipo de abordagem derivada da PD clássica, citada por Yeh (1985), é a PD com Garantias Restritas (PDGR). A análise do benefício decorrente da operação de longo prazo de um reservatório e o risco associado a ele são muito importantes e, portanto, ambos podem ser considerados objetivos da operação, onde o benefício é usualmente incorporado à função objetivo com o risco representado nas restrições. A PDGR tem sido resolvida com a consideração de uma função de penalidade. As restrições de garantia podem estar relacionadas com eventos anuais ou eventos definidos por toda vida útil do reservatório. Na Programação com Garantias Restritas, as garantias ou riscos não são fixados a priori e fazem

parte da função objetivo, enquanto que na Programação Dinâmica com Probabilidades Restritas (PDPR), os níveis de garantia ou riscos são definidos a priori, nas restrições (Simonovic e Mariño, 1980).

Para uma certa classe de problemas utilizando-se PD, pode-se tirar vantagem da estrutura especial de sua formulação e evitar o problema de dimensionalidade usualmente associado com a solução de PD. Essa situação ocorre no caso de modelos de PD com função-objetivo quadrática e com dinâmica linear. Portanto, uma técnica chamada PD Diferencial foi desenvolvida para tornar um problema no qual a função objetivo não é quadrática, e a dinâmica do sistema é não linear, e fazer com que não ocorra o problema da dimensionalidade que é associado à PD discreta clássica (Dreyfus e Law, 1977 *apud* Yeh, 1985).

### **3.2. MODELOS MULTICRITÉRIO**

Os problemas relacionados a recursos hídricos geralmente envolvem mais de um critério, além do econômico, na tomada de decisão, e a possibilidade da existência de mais de um decisor no processo. O tratamento do problema considerando apenas um critério como custo/benefício não traduz, assim, a sua complexidade, sendo necessário, portanto, o emprego de técnicas de análise multicritério. De acordo com Barbosa (1997b), “apesar das dificuldades quanto às exigências de maior número de informações e, normalmente, requerendo maior tempo para implementação, a utilização da análise multicritério tem sido uma tendência internacional, ocupando o lugar da análise benefício-custo na seleção de alternativas de projeto”. Porém, não tem havido um crescimento do número de estudos no decorrer das décadas e as aplicações destas técnicas em problemas reais ainda é muito reduzida.

A justificativa para a adoção da abordagem multicritério é que esta permite que as informações sejam mais bem organizadas e que o papel de cada decisor seja explícito, que haja evidência dos conflitos entre objetivos e o grau de compromisso entre eles e cada objetivo seja tratado na sua unidade de mensuração, sem que a solução perca precisão pelo fato da sua conversão em unidades monetárias, como é feito na análise custo-benefício (Barbosa, 1997b).

Na análise multicritério, aparecem alguns conceitos novos que serão explicitados a seguir para o maior entendimento da técnica.

Segundo Chankong e Haimes (1983), “Agente Decisor é um indivíduo ou um grupo de indivíduos que diretamente ou indiretamente fornece o valor de julgamento final que pode ser usado para classificar as alternativas disponíveis, tal que a “melhor” escolha possa ser identificada”. Outro conceito importante é o de *objetivo* que é uma declaração do estado desejado do sistema em consideração e para o qual o Agente Decisor se empenha. Os *atributos* são uma qualidade mensurável cujo valor reflete o grau de alcance de um objetivo particular. E, finalmente, *critério* refere-se aos casos em que o problema envolve tanto múltiplos objetivos quanto múltiplos atributos.

Ainda se pode introduzir o conceito de *regra de decisão* que é um conjunto de regras que facilitam o completo ordenamento das alternativas. O conceito de *meta* também é importante e consiste no valor de um certo atributo particular que é considerado como o padrão de aceitabilidade.

Uma outra confusão que se faz diz respeito à diferença entre objetivos e propósitos. Um exemplo dado por Barbosa (1997b) que esclarece essa questão é o seguinte: um empreendimento hídrico, por exemplo, um reservatório, é de múltiplos propósitos quando atende a usuários de diferentes setores e é de múltiplos objetivos quando atende a diversos objetivos tais como: eficiência econômica, redistribuição de renda, qualidade ambiental, etc.

Os problemas de recursos hídricos têm a característica de apresentarem situações conflitantes, decorrentes das limitações de recursos naturais ou financeiros, multiplicidade de usuários e interessados no problema da gestão da água, existência de objetivos não quantificáveis em termos monetários e elevado grau de interconexão dos problemas. Por tudo isso, as ferramentas de análise multicritério são as mais apropriadas para esses casos. (Barbosa, 1997b)

No caso da operação de um reservatório com múltiplos propósitos, por exemplo, os seus diversos usos podem ser conflitantes e a tentativa de satisfação destes, simultaneamente, pode não ser possível. Portanto, o conceito de solução ótima pode não ser aplicável e dar lugar ao de soluções não-dominadas. Esse conceito também aparece na literatura como ótimo de Pareto ou solução eficiente. Nesse caso, a melhoria em um objetivo leva à piora em outro, o

que é denominado de compromisso ou *trade-off*. Quando existe a possibilidade da melhora de dois objetivos ao mesmo tempo, temos as soluções dominadas ou inferiores.

O problema multicritério é caracterizado por um vetor p-dimensional de funções objetivo

$$Z(X) = [Z_1(X), Z_2(X), \dots, Z_p(X)] \quad (3.13)$$

e uma região factível X. Portanto, em lugar de se procurar por um ótimo procura-se por soluções não-dominadas (Goicoechea *et al.*, 1982). Um processo de decisão com múltiplos objetivos contém cinco etapas, mostradas esquematicamente na figura 3.2.

Existem técnicas de auxílio à decisão formais e informais. Porém, existem muitas outras, muitas vezes não apresentadas como técnicas de suporte à decisão, que ajudam na tomada de decisão, como por exemplo, a votação, as notas de uma escola, etc.

Todas essas técnicas formais são consideradas aqui de modelos de decisão e avaliação, isto é, um conjunto de regras explícitas e bem definidas para coletar, obter e processar informações com o objetivo de tornar possível se fazerem recomendações em processos de decisão e/ou avaliação.

De acordo com Bouyssou *et al.* (2000), os modelos de avaliação e decisão são úteis em diversas circunstâncias porque:

- Modelos formais conseguem uma representação explícita e não ambígua de um dado problema; eles oferecem uma linguagem comum na comunicação sobre o problema. Eles são também bastante aplicáveis na facilitação da comunicação entre os atores de um processo de avaliação ou decisão.
- Modelos formais requerem que o decisor se esforce para estruturar sua percepção ou representação do problema. Esse esforço é benéfico porque ele força o decisor a pensar mais sobre o problema.
- Quando um modelo formal é estabelecido, um grande número de técnicas formais estão disponíveis para desenhar qualquer tipo de conclusão que pode ser obtida num modelo. Isto pode ser bastante útil caso se queira chegar a recomendações robustas.

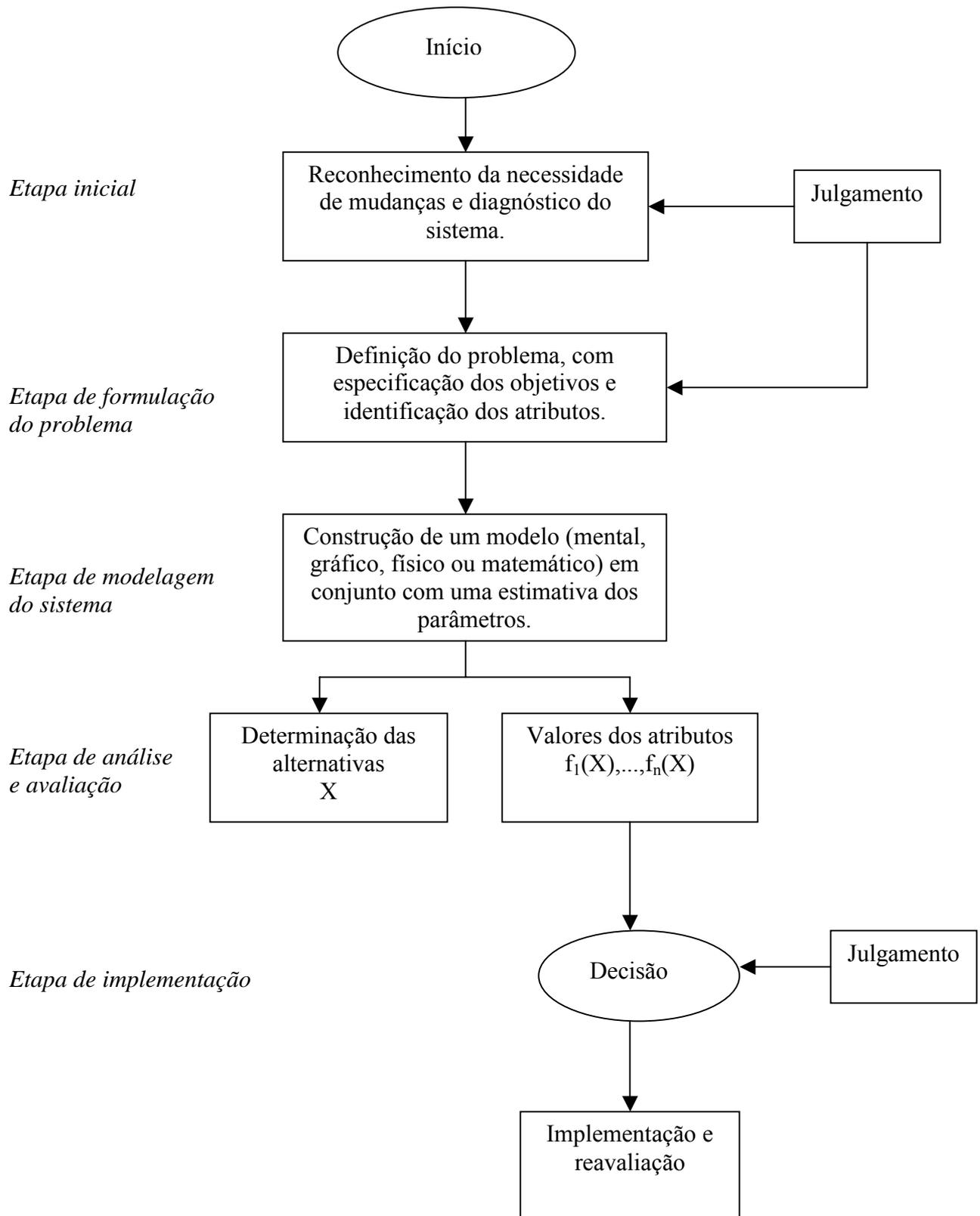


Figura 3.2 - Processo típico de decisão com múltiplos objetivos (adaptado de Chankong e Haimes, 1983)

A quantidade elevada de técnicas existentes para o tratamento de problemas multicritério dificulta a escolha da mais adequada para o problema que se pretende analisar. O emprego de cada uma delas vai depender de diversos fatores como a disponibilidade de informações, a natureza do problema, o cenário decisório, etc.

Por esse motivo, vários autores procuraram classificar as técnicas existentes de acordo com características comuns, facilitando, assim, a escolha adequada.

Segundo MacCrimmon (1973), os métodos de análise de decisão com múltiplos objetivos são divididos em quatro categorias principais: (a) Métodos de ponderação (ou pesos); (b) Métodos de eliminação seqüencial; (c) Métodos de programação matemática; (d) Métodos de proximidade espacial. Os principais métodos destas quatro categorias estão na tabela 3.3.

A classificação de Cohon e Marks (1975) foi uma das primeiras e consiste na divisão das técnicas em três grupos, organizadas de acordo com o papel do decisor no processo de tratamento das alternativas. Essa classificação está apresentada na tabela 3.4.

Todas as técnicas alocadas no Grupo I de Cohon e Marks (1975) têm o objetivo de identificar o conjunto de soluções não inferiores, isto é, aquelas cuja melhora em relação a um objetivo ocasiona uma piora em relação a outro objetivo, o máximo que se pode conseguir em um problema com múltiplos objetivos conflitantes. É preciso se obter uma piora em relação a um objetivo para conseguir algo em troca em relação a outro objetivo, sendo isto o conceito de *trade-off* ou *compromisso*. Estas soluções constituem o conjunto *Pareto* ótimo. Isto é feito sem informações de preferência dos decisores. Alguns métodos dessa classe estão entre os primeiros procedimentos de solução multicritério desenvolvidos.

Os métodos do Grupo II são baseados na observação de que um ordenamento completo, ou pelo menos mais completo, pode ser obtido. A base para esse ordenamento é a articulação de preferências antes da solução do problema multicritério.

O Grupo III consiste em técnicas nas quais o decisor participa ao longo de todo processo de solução do problema. Isto é feito da seguinte forma: encontra-se uma solução não inferior e submete-se a mesma aos decisores que emitem sua opinião sobre ela, resultando na alteração

da formulação do problema. Os passos anteriores são repetidos até que os decisores fiquem satisfeitos ou até que alguma outra regra seja aplicada.

Tabela 3.3 - Classificação dos métodos multicritério feita por MacCrimmon (1973)

<b>Métodos de Ponderação (ou Pesos)</b>
<i>Com preferências inferidas</i>
Regressão linear
Análise de variância
Regressão semi-linear
<i>Com preferências avaliadas diretamente – agregação geral</i>
Intercâmbios (“trade-offs”)
Ponderação aditiva simples
Ponderação aditivo-hierárquica
Ponderação semi-aditiva
<i>Com preferências diretamente avaliadas – agregação especializada</i>
Maximin.
Maximax.
<b>Métodos de Eliminação Seqüencial</b>
<i>Alternativa versus padrão – comparação entre atributos</i>
Restrições disjuntivas e conjuntivas
<i>Alternativa versus alternativa – comparação entre atributos</i>
Dominância
<i>Alternativa versus alternativa – comparação entre alternativas</i>
Lexicografia
Eliminação por aspectos
<b>Métodos de Programação Matemática</b>
<i>Função objetivo global</i>
Programação Linear
<i>Metas ou restrições</i>
Programação de metas (“goal programming”)
<i>Objetivos locais iterativos</i>
Programação multicritério interativa
<b>Métodos de Proximidade Espacial</b>
<i>Gráficos de iso-preferência</i>
Mapa de indiferenças
<i>Pontos ideais</i>
“Comparação” multidimensional não-métrica
<i>Preferências gráficas</i>
Sobreposição gráfica

Tabela 3.4 – Classificação de técnicas multicritério segundo Cohon e Marks (1975)

<b>GRUPO</b>	<b>MÉTODO</b>
GRUPO I – Técnicas de geração de soluções não dominadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método dos pesos</li> <li>- Método das restrições</li> <li>- Derivação de uma relação funcional para o conjunto não-inferior</li> <li>- Procura adaptativa</li> </ul>
GRUPO II – Técnicas de articulação de preferências a priori	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Programação por metas</li> <li>- Obtenção da função de utilidade</li> <li>- Estimativa de pesos ótimos</li> <li>- Método de substituição da pior relação de troca</li> <li>- Electre</li> </ul>
GRUPO III – Técnicas com articulação progressiva das preferências	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método dos passos</li> <li>- Método dos pesos interativos</li> <li>- Solução de problemas multicritério seqüenciais (SEMOPS)</li> </ul>

Goicoechea *et al.* (1982) classificaram os métodos multicritério de uma maneira semelhante à classificação feita por Cohon e Marks (1975), porém eles dividiram o Grupo II, resultando em quatro grupos ao invés de três. Essa divisão foi feita separando os métodos contínuos dos discretos, isto é, métodos que tratam de alternativas contínuas ou discretas. A referida classificação encontra-se na tabela 3.5.

Do mesmo modo que na classificação descrita anteriormente, o Grupo I agrupa métodos que geram soluções não-dominadas e lidam apenas com a realidade física do problema, não considerando as preferências dos decisores.

Nos métodos do Grupo II, o decisor é requisitado para dar sua opinião a respeito de uma certa estrutura e suas preferências são levadas em conta na formulação de um modelo matemático para o problema multicritério. Nesse grupo, estão apenas métodos que lidam com alternativas contínuas.

Existem muitas situações de decisão em que o decisor tem de escolher entre um número finito de alternativas, as quais são avaliadas sob um conjunto comum de critérios comensuráveis ou não. Os métodos agrupados no Grupo III foram desenvolvidos para tratar esse tipo de problema.

Tabela 3.5 – Classificação dos métodos multicritério segundo Goicoechea *et al.* (1982)

<b>GRUPO</b>	<b>MÉTODO</b>
GRUPO I – Métodos de geração de soluções não dominadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método dos pesos</li> <li>- Método das restrições</li> <li>- Método multicritério linear de Phillip</li> <li>- Método multicritério linear de Zenely</li> </ul>
GRUPO II – Métodos contínuos com articulação de preferências a priori	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Programação por metas</li> <li>- Obtenção da função de utilidade</li> <li>- Método de substituição da pior relação de troca</li> </ul>
GRUPO III – Métodos discretos com articulação de preferências a priori	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método de seleção para exclusão</li> <li>- Ordenamento Conjuntivo</li> <li>- Função de bem estar social razoável de Copeland</li> <li>- Média Ponderada</li> <li>- Electre I</li> <li>- Electre II</li> </ul>
GRUPO IV – Métodos de articulação progressiva das preferências	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método dos passos</li> <li>- Método de Geoffrion</li> <li>- Método de Zionts-Wallenius</li> <li>- Programação de Compromisso</li> <li>- Método seqüencial SEMOPS</li> </ul>

O Grupo IV é semelhante ao Grupo III da classificação de Cohon e Marks (1975), onde os métodos desses grupos requerem um grande envolvimento do decisor no processo de solução.

Posteriormente, foi desenvolvida outra classificação, proposta por Vincke *et al.* (1992), levando em consideração a maneira como é feito o ordenamento das alternativas na solução. Os métodos foram divididos em três famílias, conforme a tabela 3.6 a seguir.

Roy (1985) *apud* Vincke *et al.* (1992) nomeou essas famílias, respectivamente:

- (1) Métodos com critério único de classificação, sem incomparabilidade;
- (2) Métodos com desclassificação, aceitando incomparabilidade;
- (3) Métodos de julgamento interativo local, com interações de tentativa e erro.

Tabela 3.6 – Classificação dos métodos multicritério feita por Vincke *et al.* (1992)

FAMÍLIA	MÉTODO
1ª FAMÍLIA – Teoria de utilidade multiatributo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo Aditivo</li> <li>- Processo Analítico Hierárquico</li> </ul>
2ª FAMÍLIA – Métodos de desclassificação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método ELECTRE</li> <li>- Métodos que envolvem uma relação de importância entre os critérios</li> <li>- Segmentação Tripla</li> <li>- Método PROMETHEE</li> <li>- Método de desclassificação incerto</li> </ul>
3ª FAMÍLIA – Métodos interativos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método STEM</li> <li>- Geoffrion <i>et al.</i> (1972)</li> <li>- Roy (1976)</li> <li>- Zionts e Wallenius (1976)</li> <li>- Vincke (1976b)</li> <li>- Wierzbicki (1980)</li> <li>- Steuer e Choo (1983)</li> <li>- Korhonen e Laakso (1986)</li> <li>- Jacquet-Lagrèze <i>et al.</i> (1987)</li> <li>- Vanderpooten (1988)</li> </ul>

Schärlig (1985) *apud* Vincke *et al.* (1992) disseram sobre os métodos de agregação que são, respectivamente, completos, parciais e locais.

1ª família: agregação de diferentes pontos de vista em uma única função a qual deve ser otimizada posteriormente.

2ª família: objetiva construir uma relação, chamada relação de desclassificação, a qual representa as preferências dos decisores.

3ª família: métodos que alternam etapas de cálculo e etapas de diálogo. Eles são mais desenvolvidos como Programação Matemática Multicritério.

A primeira família baseia-se na teoria de utilidade multiatributo, a qual segue o seguinte axioma: qualquer decisor deseja inconscientemente maximizar ou minimizar alguma função, permitindo o ordenamento de todas as ações da melhor para a pior.

Os métodos de desclassificação, agrupados na segunda família, podem ser divididos em duas etapas: construir a relação de desclassificação e utilizá-la com a consideração de um certo problema escolhido. Com esses métodos, pode-se ter relações de incomparabilidade entre

ações e as relações de desclassificação não são necessariamente transitivas. A maioria dos métodos de desclassificação foram propostos para problemas nos quais o número de ações é finito.

Os métodos interativos, da terceira família, consistem em alternar etapas computacionais e diálogo com os decisores. Os decisores trazem uma contribuição direta na elaboração de uma solução, intervindo no procedimento e não apenas na definição do problema.

A adequação do modelo a ser utilizado ao problema de decisão é determinada por diversos fatores como disponibilidade de informações, recursos de informática, etc. Porém, existem alguns métodos que possuem maior aplicabilidade nos problemas de recursos hídricos e, portanto, esses serão detalhados a seguir.

### **3.2.1. Função utilidade ou valor**

A função utilidade é aquela que representa matematicamente a preferência do decisor, incorporando a maneira como este age em situações de incerteza. Ela é representada por uma variável normalizada, isto é, com valor entre zero e um, onde o valor zero representa a pior consequência e o valor um a melhor consequência.

Para que as preferências do decisor possam ser representadas pela função utilidade é necessária a satisfação de algumas condições, denominadas axiomas do comportamento racional, que representam o comportamento racional e consistente do decisor na escolha entre alternativas com diferentes probabilidades de ocorrência.

No tratamento de problemas com múltiplos objetivos, é feita uma combinação das funções utilidade de cada atributo resultando em uma função utilidade multidimensional a qual representa todos os atributos. A identificação das soluções é feita com variáveis contínuas.

Este método apresenta a vantagem de possibilitar a avaliação explícita das alternativas por meio de suas utilidades totais, porém, as suposições psicológicas envolvidas são muito rígidas e não existe um procedimento eficiente de análise de sensibilidade dos resultados (Goicoechea et al., 1982).

### 3.2.2. Método analítico hierárquico

O método analítico hierárquico fornece a hierarquia (classificação) de alternativas por meio de uma comparação paritária, utilizando matrizes quadradas, recíprocas, positivas e irredutíveis, com base nas propriedades da álgebra matricial.

Cada elemento  $a_{i,j}$  da matriz representa o resultado da comparação da alternativa  $i$  com a alternativa  $j$ , sendo,  $a_{j,i} = 1/a_{i,j}$ , devido à reciprocidade característica do processo comparativo usado no método.

A consistência dos julgamentos, na forma dos elementos da matriz é representada por  $a_{i,k} = a_{i,j} \times a_{j,k}$  (para quaisquer  $i,j,k$ ), que também estabelece a condição de transitividade no processo comparativo.

Na estrutura do método, tem-se  $a_{i,j} = w_i/w_j$ , para  $i,j = 1,2,3,\dots,n$ . Cada elemento da matriz é definido pelo quociente dos valores representativos (pesos ou medidas) das alternativas comparadas.

Na presença de decisores bem informados e qualificados é possível, a partir da disponibilidade de  $n-1$  comparações paritárias (uma linha da matriz) e com julgamentos consistentes, obter todas as demais comparações possíveis.

Na prática, há várias formas para a determinação do vetor de prioridades (auto vetor normalizado) a partir de uma matriz de comparações paritárias, que seja quadrada, recíproca, positiva e irredutível.

A melhor solução é obtida pela elevação da matriz a potências arbitrariamente altas, obtendo-se os componentes do vetor de prioridades por meio da soma dos elementos de cada linha, dividindo-se pela soma de todos os elementos da matriz.

Para obtenção do autovalor máximo  $\lambda_{\text{máx}}$ , multiplica-se a matriz quadrada das comparações paritárias pelo vetor de prioridades obtendo-se, como resultado, um outro vetor coluna. O autovalor máximo é obtido pela média aritmética dos quocientes entre os componentes dos dois vetores-coluna.

### 3.2.3. Métodos da série ELECTRE

Os métodos da família Electre (Elimination and (Et) Choice Translating Reality) foram desenvolvidos por Roy e por seus colaboradores em Paris-Dauphine e são aplicáveis nos casos de tratamento de alternativas discretas avaliadas qualitativamente. Esses métodos pertencem à família dos métodos de desclassificação, de acordo com a identificação feita por Vincke (1992) e por Barbosa (1997b) e fazem parte do grupo de técnicas com articulação de preferências a priori. Existem vários métodos da família Electre, e cada qual se adequa a uma problemática decisória diferente, como está apresentado na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Adequação dos métodos Electre às problemáticas decisórias de referência

Problemática	Objetivo	Resultado	Procedimento	Métodos
$\alpha$ (alfa)	Escolha de um subconjunto contendo as melhores ações ou, na ausência dessa possibilidade, as satisfatórias.	escolha	seleção	Electre I
$\beta$ (beta)	Triagem por alocação de ações em categorias pré-definidas.	triagem	alocação	Electre Tri
$\gamma$ (gama)	Definição, por ordenamento completo ou parcial, de classes de equivalência, compostas por ações que se comparam entre si.	seqüência	classificação	Electre II, III e IV.

Fonte: adaptada de Generino e Cordeiro Netto (1999)

#### Electre I

A metodologia do Electre I é a separação das alternativas que são preferidas na maioria dos critérios do conjunto total de alternativas, as quais não causam um nível inaceitável de descontentamento nos outros critérios. A comparação entre as alternativas é feita estabelecendo-se relações de preferência, onde são relevantes os conceitos de concordância e discordância. A concordância entre duas alternativas representa a posição do decisor na escolha de uma alternativa em relação à outra. Um conjunto de pesos é associado aos critérios. O conceito de discordância é complementar ao de concordância e representa o nível de desconforto provocado pela escolha de uma alternativa em relação à outra (Braga e Gobetti, 1997).

## Electre II

A ferramenta Electre II utiliza-se dos gráficos obtidos por meio da aplicação do Electre I como dados de entrada. O método ordena as alternativas de duas formas: a classificação progressiva e a classificação regressiva. A média das classificações alcançadas em cada estágio corresponde à classificação final das alternativas.

## Electre III

Essa técnica tem caráter quantitativo e classifica as diversas alternativas para solução de um problema que contém um único decisor. No caso do problema possuir mais de um decisor, o método Electre III pode ser aplicado mais de uma vez, cada qual com um conjunto de pesos atribuídos aos critérios por um decisor diferente. Esse método também considera outras relações além da preferência, que são a indiferença e a incomparabilidade, além da relação de preferência poder ser forte ou fraca.

No processo de comparação utilizado no Electre III, primeiramente as alternativas são comparadas duas a duas, o que é feito pela atribuição de um índice de concordância entre cada par de alternativas. Após a definição deste índice, é atribuído um índice de discordância que consiste na medida pela qual o critério “i” refuta a asserção de que uma alternativa é tão boa quanto a outra. A combinação desses dois índices resulta em um índice de credibilidade.

## Electre IV

É o método de estrutura mais simples dentre os métodos da família Electre. Utiliza somente os limiares de preferência estrita e de indiferença, não existindo noções de concordância e nem de discordância. É bastante útil no caso em que há dificuldade na ponderação dos critérios ou mesmo quando os jogos de ponderação são antagônicos. (Generino e Cordeiro Netto, 1999).

Electre Tri

Nesse método, é feito um enquadramento das alternativas em categorias previamente definidas. Não há, portanto, comparação das alternativas entre si, e sim uma alocação destas em diferentes categorias. Cada uma dessas categorias está limitada inferior e superiormente por duas ações de referência e cada uma delas serve de limite para outras duas categorias, uma superior e outra inferior.

### 3.2.4. Promethee

O método Promethee (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations) estabelece uma estrutura de preferência entre alternativas discretas, do mesmo modo que o Electre. A estrutura de preferência é definida pela comparação entre duas alternativas por:

$$a P b \quad \text{se} \quad f(a) > f(b) \quad (3.14)$$

$$a I b \quad \text{se} \quad f(a) = f(b) \quad (3.15)$$

onde  $a$  e  $b$  são duas alternativas possíveis e  $f$  é um critério de avaliação,  $P$  refere-se a preferência e  $I$  a indiferença. Neste método, não existem as relações de preferência forte ou fraca. Para cada critério é definida uma função de preferência dada por:

$$P(a,b) = 0 \quad \text{se} \quad f(a) \leq f(b) \quad (3.16)$$

$$P[f(a) - f(b)] \quad \text{se} \quad f(a) > f(b) \quad (3.17)$$

A função de preferência é determinada graficamente pela função  $H(x)$ , com:

$$H(x) = P(a,b) \quad x \geq 0 \quad (3.18)$$

$$H(x) = P(b,a) \quad x \leq 0 \quad (3.19)$$

Sendo:  $x = f(a) - f(b)$

Uma vantagem da utilização do método Promethee é a possibilidade da utilização de seis funções de preferência diferentes para cada critério. A classificação das alternativas no método Promethee é feita pela definição de um índice de preferência global de uma alternativa sobre a outra, que é dado como:

$$\pi(a, b) = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i(a, b) \quad (3.20)$$

$$\text{com: } \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (3.21)$$

onde  $\alpha_i$  são os pesos associados a cada critério.

A avaliação de cada alternativa é feita mediante a consideração das duas quantidades a seguir:

- *Fluxo de importância positivo*, o qual é uma estimativa de quanto cada alternativa domina as outras.

$$\varphi^+(a) = \sum_{x \in X} \pi(x, a) \quad (3.22)$$

- *Fluxo de importância negativo* que expressa quanto cada alternativa é dominada pelas outras.

$$\varphi^-(a) = \sum_{x \in X} \pi(x, a) \quad (3.23)$$

No Promethee I, é feito um ordenamento parcial das alternativas e no Promethee II um ordenamento total, com base nos valores de  $\varphi^+(a)$  e  $\varphi^-(a)$ .

### 3.2.5. Programação de compromisso (“Compromise Programming”)

Segundo Braga e Gobetti (1997), “a programação de compromisso baseia-se em uma noção geométrica do melhor”, isto é, são identificadas soluções que se encontrem mais próximas da solução ideal por meio de uma medida de proximidade. O método Programação de Compromisso (PC) é um método iterativo. Este requer um grande envolvimento do decisor no

processo de solução. A solução é definida como o vetor  $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$ , onde  $f_i^*$  são as soluções do problema:

$$\begin{aligned} \text{Max } f_i(x) & \hspace{20em} (3.24) \\ \text{Sujeito a: } \quad x & \in X \\ & i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

sendo:

$x$  – vetor de decisões;

$n$  – número de critérios;

$X$  – conjunto das soluções viáveis, e

$f_i(x)$  – função-objetivo para o critério  $i$ .

A solução de compromisso é dada, na sua definição operacional, por:

$$\min \left\{ L_S(x) = \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i^S \left[ \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_i^{**}} \right]^S \right)^{1/S} \right\} = L_S(x_S^*) \quad (3.25)$$

$$1 \leq s \leq \infty$$

onde:

$L_S(x)$  é a medida de proximidade;

$S$  reflete a importância que o decisor atribui aos desvios máximos;

$\alpha_i$  – conjunto de pesos atribuídos pelos decisores;

$f_i^{**}$  - vetor dos piores valores na matriz de avaliação;

$f_i^*$  - melhores valores no conjunto finito dos  $f_i(x)$ .

De acordo com Cohon e Marks (1975), a desvantagem dos métodos iterativos é a possibilidade de que não exista uma melhor solução de compromisso, se o decisor não ficar satisfeito após um certo número de iterações.

Segundo Goicoechea *et al.* (1982), a aplicação da Programação de Compromisso não é restrita a variáveis contínuas, e pode ser adaptada a variáveis discretas também.

## **4. MODELOS APLICADOS À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS**

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da bibliografia existente sobre a aplicação de técnicas de pesquisa operacional para gestão de reservatórios com múltiplos usos. Foram identificadas experiências de diversos autores na aplicação de programação matemática para alocação da água dentre usos conflitantes, em que as técnicas de otimização foram adaptadas a cada caso estudado, obtendo-se variações por meio das quais um sistema era melhor representado. Foi feita, também, uma coleta de experiências na aplicação de técnicas de análise multicritério na gestão de recursos hídricos, além de comparações entre as técnicas existentes por meio da aplicação a um mesmo problema.

Essa pesquisa possibilitou a identificação de técnicas suscetíveis de serem aplicadas neste trabalho. Os métodos escolhidos foram mais bem detalhados para permitir uma melhor discussão.

### **4.1. MODELOS MONOCRITÉRIO**

#### **4.1.1. Revisão bibliográfica**

A importância da otimização na tomada de decisão entre alternativas de projetos de engenharia é indiscutível. A sua aplicação no início se dava apenas no seu estado da arte em disciplinas científicas. Com a evolução dos computadores, os problemas de grande escala puderam ser resolvidos com exatidão, o que era impossível manualmente. Com isso, surgiram novas técnicas de otimização e a evolução considerável das técnicas já existentes.

A evolução nas ferramentas computacionais tornou possível a utilização de modelos de otimização mais realistas. No entanto, isto nem sempre é o mais adequado, visto que o número excessivo de dados utilizados na modelagem pode trazer uma certa confusão ao decisor. Portanto, deve-se procurar um equilíbrio entre a melhor reprodução da realidade e a quantidade de dados passíveis de serem levantados e que garanta a obtenção de conclusões no término da aplicação do modelo (Beale, 1988). Segundo Lanna (1997), “a abordagem sistêmica está relacionada à abstração, ou simplificação de um problema complexo de tal maneira que apenas sejam mantidas as informações mais relevantes para a sua solução”.

Os modelos de otimização são utilizados pelos tomadores de decisão na geração de políticas consideradas ótimas para a operação de reservatórios. A maioria dos modelos de otimização é baseada em algum tipo de técnica de programação matemática. Como já discutido, a classificação básica destas técnicas consiste em Programação Linear (PL), Programação Dinâmica (PD) e Programação Não-Linear (PNL).

### *Programação Linear e Programação Não-Linear*

A aplicação de PL em recursos hídricos varia de problemas simples como alocação direta de recursos até situações complexas de operação. Alguns problemas não-lineares podem ser linearizados por meio de técnicas específicas e adotando-se algumas hipóteses e resolvidos por iteração ou procedimentos aproximados. Quando a PL é aplicada na operação de reservatórios, os objetivos geralmente são a minimização do custo do reservatório ou a maximização dos benefícios anuais, os quais são função do armazenamento e da vazão liberada (Yeh, 1985).

Há uma série de variações na técnica de PL original descritas na literatura. Essas metodologias são elaboradas na tentativa de adequar a PL aos problemas encontrados, como por exemplo, diversas formas de lidar com a estocasticidade dos eventos hidrológicos.

Segundo Barbosa (1997a), as vantagens da aplicação da Programação Linear são: (a) flexibilidade para adaptação a um grande número de problemas; (b) facilidade de entendimento da técnica com relação às demais técnicas existentes; (c) problemas de grande porte são mais facilmente tratados; (d) facilidade na aquisição de aplicativos no mercado. Porém, ele cita a desvantagem da limitação quanto à linearidade das funções, o que não acontece na maioria dos problemas na área de recursos hídricos.

Uma maneira de se trabalhar com problemas estocásticos, onde se tem um grande número de variáveis aleatórias, é a redução dessas variáveis em apenas uma aplicando-se o método da convolução, obtendo-se assim uma nova variável aleatória definida pela diferença entre as variáveis aleatórias originais. Isto faz com que se reduza a dimensionalidade de problemas de grande porte, como os de múltiplos reservatórios. Para o emprego da convolução, as variáveis originais precisam ser independentes. Esse método foi aplicado por Mélló *et al.* (1997) no reservatório Poção da Ribeira no estado de Sergipe. A desvantagem encontrada por ele foi a

não penalização de possíveis violações nas restrições, pois o modelo não promove ações recursivas para corrigir tais violações, podendo haver soluções que não atendam a todas as restrições.

A utilização conjunta de modelos de otimização linear e de simulação para solução de problemas estocásticos é uma outra alternativa para o tratamento destes problemas. A linearização das equações pode resultar na formulação aproximada da realidade. Com a utilização de um modelo de simulação, a realidade é representada de forma mais aproximada, sem necessidade de linearizações. A utilização conjunta dos dois modelos permite a obtenção das vantagens da otimização automática e também corrige os erros de aproximação ocorridos na linearização do problema (Oliveira e Lanna, 1997).

Outra forma de se trabalhar com a não linearidade, com o uso de PL, é a aplicação do algoritmo de programação linear recursivo heurístico, aplicado por Curi e Curi (1998) na operação integrada de reservatório, poços e área irrigada. Esse algoritmo consiste na estimativa dos valores iniciais da área média mensal da superfície líquida do reservatório e da taxa mensal de infiltração para que com isto se calcule, via programação linear, as áreas alocadas para cada tipo de cultura e cada sistema de adução de água. No estudo desenvolvido, foi aplicado um processo iterativo no qual os volumes e as áreas do reservatório e a taxa de infiltração foram atualizados e, posteriormente, calculou-se a norma da diferença das áreas irrigadas por cultura, da área do reservatório e das taxas de infiltração, testando a convergência dessa norma até se chegar a um valor otimizado.

Loucks e Dorfman (1975) avaliaram e compararam algumas Regras de Decisão Linear (RDL) utilizadas em modelos com probabilidades restritas aplicadas na estimativa de regras operativas eficientes de reservatórios. O estudo avaliou a escolha da regra de decisão utilizada no desenvolvimento de restrições determinísticas equivalentes nos modelos de restrições probabilísticas, não terminando o debate sobre a aplicabilidade dessas regras e sim fornecendo informações relevantes a uma análise crítica destas. Foram estudadas duas regras de decisão linear das diversas existentes e concluiu-se que os resultados encontrados na simulação de ambas as regras estudadas são conservativos e isto consiste em uma limitação básica desses modelos. Porém, segundo esses autores o seu uso associado a outros tipos de modelos é útil na estimativa da relação entre as quantidades e as garantias esperadas.

Houck e Datta (1981) aplicaram um modelo de Programação Linear com Probabilidades Restritas que incorporou as Regras de Decisão Lineares (RDL) e foi feita uma comparação dos resultados obtidos pela aplicação das RDL simples e das RDL múltiplas, onde as RDL múltiplas consistem na aplicação das RDL simples mais de uma vez por período, cada uma condicionada na vazão do período anterior. As soluções resultantes da aplicação das RDL múltiplas são comparadas entre si e com a solução das RDL simples. De acordo com os resultados obtidos, o modelo de RDL múltiplas se mostrou superior ao de RDL simples porque nas RDL múltiplas a capacidade do reservatório encontrada foi menor que a das RDL simples e quando as regras operativas definidas pelo modelo são testadas num caso real de operação de um reservatório, os resultados das RDL múltiplas ficaram mais próximos das especificações da programação linear do que os das RDL simples. Porém, o modelo de RDL simples é menor que o de RDL múltiplas, permitindo o tratamento de grandes sistemas de reservatórios ou de diversos usos em um único reservatório.

Outra aplicação de Regras de Decisão Lineares com Probabilidades Restritas foi feita por Joeres *et al.* (1981), na qual um modelo de RDL para um reservatório explicita a estrutura de correlação das vazões afluentes. Foram determinadas três regras de decisão que são: aquela que inclui as vazões estimadas como variáveis de estado (regra preditiva); a que assume vazões mensais não correlacionadas (regra independente); e aquela que considera a vazão conhecida num período anterior como dado (regra utópica). Existe uma falha na aplicação de modelos RDL que é a consideração das vazões em períodos sucessivos como independentes uma das outras. No mencionado artigo, foi desenvolvida uma metodologia que inclui uma estrutura de autocorrelação das medições de vazão explicitamente na formulação da RDL. Uma estrutura teórica foi desenvolvida para comparar facilmente as soluções obtidas por diferentes RDL.

Simonovic e Mariño (1980) aplicaram a técnica de Programação com Garantias Restritas para um reservatório de múltiplos usos. Eles apresentaram uma extensão do estudo feito por Corlorni e Fronza's (1976) *apud* Simonovic e Mariño (1980). Utilizaram a Programação com Garantias Restritas com duas restrições probabilísticas: risco de cheia e risco de escassez. O algoritmo desenvolvido pode ser aplicado a problemas com mais de duas restrições probabilísticas. Eles utilizaram como variáveis de decisão a vazão liberada mensalmente do reservatório e o objetivo do estudo foi a maximização dessa vazão. O valor inicial do armazenamento era conhecido. Uma vantagem da aplicação da Programação com Garantias

Restritas é a determinação do nível de risco ótimo baseado em benefícios e perdas de eficiência econômica.

Fazendo-se uma comparação entre a aplicação de Programação Linear e Programação Não-Linear, tem-se que problemas de PL são mais facilmente resolvidos e garantem a obtenção da solução ótima para o problema. A desvantagem na sua aplicação se dá pela dificuldade de se linearizar o problema, perdendo-se a sua precisão à medida que cresce a sua não-linearidade. No caso da PNL, um dos maiores problemas da sua aplicação é a incerteza de que a solução ótima é obtida e também a dificuldade de convergência de alguns problemas. A grande vantagem da aplicação da PNL é a sua abrangência, necessitando de pouca simplificação do problema em termos de formulação, aumentando assim a precisão dos resultados (Cirilo, 1997).

Uma aplicação de Programação Não-Linear foi feita por Sinha *et al.* (1999), na qual um modelo de otimização não-linear foi aplicado na seleção de sistemas de reservatórios de múltiplo uso. Os autores fizeram uma conjugação de simulação e otimização e utilizaram um algoritmo de análise de comportamento para determinar a capacidade dos reservatórios. O algoritmo de análise de comportamento é um procedimento iterativo que envolve processamento repetitivo do gráfico de depleção da capacidade do reservatório, na busca do volume armazenado capaz de atender às demandas projetadas. Nesse caso, as variáveis de decisão eram conhecidas e foram utilizadas para a obtenção dos valores da função-objetivo e das restrições, que foram analisados quanto à satisfação de critérios de otimalidade. Foi utilizado o algoritmo proposto por Zhou e Tits (1992) *apud* Sinha *et al.* (1999), de programação seqüencial quadrática, para a resolução do problema.

Outra aplicação de PNL foi feita utilizando-se o software MATLAB, por Curi *et al.* (1997), em que foi estudada a alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arcoverde, para fins de irrigação. Foi construído um modelo de maximização no qual a função-objetivo era relativa ao lucro obtido nas áreas irrigadas. As restrições foram elaboradas em função do balanço hídrico, das limitações hidráulicas e da não negatividade das variáveis. Foram estudadas duas abordagens: numa delas foi determinada uma única área irrigável durante todo ano e, na outra, foram determinadas áreas diferenciadas, para o período normal de chuvas, e para o período de estiagem.

## *Programação Dinâmica*

São muitas as vantagens da aplicação da PD em relação às outras técnicas de otimização, como, por exemplo, a sua utilização num grande número de problemas de programação discreta, na qual os problemas de recursos hídricos geralmente se encaixam. Outra vantagem muito importante é que as funções-objetivo e as restrições podem ser não-lineares e até mesmo descontínuas, o que ocorre na maioria dos problemas reais. Existe também a vantagem da divisão do problema em estágios, flexibilizando a análise de problemas mais complexos. Uma das desvantagens da aplicação desse método é a chamada *praga da dimensionalidade*, que consiste na elevada discretização das variáveis de estado fazendo com que o número de possibilidades que devem ser analisadas a cada estágio seja muito grande, exigindo memória e tempo de processamento.

De acordo com Barros (1997), “para problemas na área de planejamento, projeto e operação que consistem em processos de decisão seqüencial em estágios, como a operação de reservatórios, a Programação Dinâmica é considerada o método ideal de abordagem”.

Uma aplicação da Programação Dinâmica Determinística, associada a uma análise de regressão e um modelo de simulação, foi feita por Karamouz e Houck (1982). O algoritmo resultante da interação dessas técnicas foi testado em quarenta e oito casos, sendo doze operados anualmente e trinta e seis mensalmente. A obtenção do ótimo global não é assegurada na aplicação do algoritmo proposto, porém a aplicação deste a diversos casos fez com que houvesse significativas melhoras nos resultados obtidos por meio da comparação destes e da identificação das similaridades. Outros intervalos de tempo, como, por exemplo, o sazonal, podem ser desenvolvidos com o mesmo princípio. Mais de um critério ou objetivo podem ser considerados na aplicação desse método.

A praga da dimensionalidade da PD é um dos maiores desafios para os pesquisadores da área operacional e, portanto, muitos métodos foram desenvolvidos para reduzi-la. De acordo com Yeh (1985), todos esses métodos envolvem a decomposição do problema em subsistemas e utilizam-se de processos iterativos. Lidar com a estocasticidade dos eventos hidrológicos é outro objetivo de diversos estudos desenvolvidos na área de pesquisa operacional. No caso de reservatórios onde se deseja otimizar a operação em longo prazo, mensalmente ou anualmente, a estocasticidade da vazão afluente tem de ser considerada. Isso pode ser feito

por meio de considerações probabilísticas ou pela aplicação do método Monte Carlo, o qual gera séries sintéticas de vazão.

O problema da dimensionalidade que ocorre na aplicação da Programação Dinâmica Estocástica Explícita aos problemas de operação de reservatórios é devido à adoção de um número excessivo de estados que representam os níveis de armazenamento, os quais estão sujeitos a restrições. Portanto, deve-se procurar uma quantidade ótima de discretização dos níveis do reservatório para impedir a ocorrência de imprecisão e distorção da realidade devido ao aumento do número de restrições. Klemes (1977) propôs uma regra linear para estimar o número de estados de armazenamento que garante uma certa precisão dos resultados, além de relacionar o número de estados de armazenamento, com a capacidade de armazenamento, fazendo com que seja possível uma estimativa do número de estados de armazenamento necessários para a obtenção de probabilidades de ocorrência de níveis críticos (capacidades máxima e mínima do reservatório), com erro de 0,1% para as distribuições log normal e normal.

Outro estudo foi realizado por Mohammadi e Mariño (1982) com a finalidade, à época, de reduzir o tempo de processamento computacional, além de diminuir a memória requerida. O modelo desenvolvido é uma combinação de Programação Linear e Programação Dinâmica e foi aplicado na otimização da operação mensal e anual, respectivamente, de um reservatório com múltiplos usos. A seleção da função objetivo variou de acordo com os propósitos do operador do sistema. A escolha da função objetivo deu flexibilidade ao operador do reservatório na escolha do objetivo que melhor satisfaça as demandas da área. Algumas vantagens foram citadas pelos autores como: o algoritmo para a solução do problema não requer uma solução inicial viável; diminuição da memória necessária para o processamento; além de o modelo ser bastante geral e poder ser aplicado a reservatórios com múltiplos usos.

Kelman *et al.* (1990) aplicaram a chamada Programação Dinâmica Estocástica Amostral (PDEA) na operação de um sistema de reservatórios de produção de energia elétrica. Essa técnica trata da estrutura espacial e temporal complexa das vazões utilizando um grande número de amostras de seqüências de vazões anuais observadas ou geradas estocasticamente. Essas séries de vazões anuais foram chamadas de “cenários de vazões”. Para um único cenário de vazões, o modelo PDEA é reduzido a uma Programação Dinâmica Determinística. A vantagem levantada na aplicação da PDEA, comparando-a com a Programação Dinâmica

Estocástica tradicional, é que aquela emprega vazões selecionadas historicamente ou geradas sinteticamente e com isso a persistência da real seqüência anual de vazões pode ser obtida no cálculo dos benefícios esperados.

Karamouz e Vasiliadis (1992) propuseram um modelo denominado Programação Dinâmica Estocástica Bayesiana (PDEB) e compararam os resultados obtidos na operação de um reservatório com a aplicação da Programação Dinâmica Estocástica (PDE). Esse modelo, que considera como variáveis de estado a vazão afluente, o armazenamento e a previsão de vazões, descreve as vazões como um processo Markoviano discreto de primeira ordem e utiliza a Teoria de Decisões de Bayes para incorporar novas informações fazendo uma substituição das probabilidades obtidas inicialmente com as obtidas posteriormente. Essa contínua substituição pode reduzir os efeitos das incertezas naturais do modelo.

Outra aplicação de técnicas de programação estocástica foi feita por Vedula e Mujumdar (1992), onde foi elaborado um modelo com a finalidade de se estabelecer uma política operacional ótima para um reservatório utilizado para irrigação de diversas culturas. Para isso, foram formulados cenários utilizando-se a Programação Dinâmica Estocástica. Foi utilizada, ainda, a Programação Linear na seleção da melhor combinação das diversas culturas e a Simulação na previsão de mudanças no volume armazenado pelo reservatório. Foram considerados diversos aspectos na modelagem como o tipo de cultura a ser irrigada e as fases do seu desenvolvimento, seu estágio de crescimento, a competição entre diferentes culturas pela água disponível e o efeito do déficit no suprimento de água sobre a produção. Segundo os autores, a maior fragilidade do modelo é a consideração da diferença na umidade do solo entre as diferentes culturas no período considerado. Isso pode ser evitado com a definição da umidade como variável de estado, para cada cultura, na formulação do problema. Outra limitação do estudo está no fato de que a precipitação e a evaporação foram consideradas determinísticas enquanto que a vazão afluente ao reservatório foi considerada estocástica. No caso estudado, isso não implicou em problemas mais sérios visto que a área a ser irrigada pelo reservatório possui uma baixa precipitação.

Um problema encontrado na operação de reservatórios é como fazer a alocação ótima de água para os usuários indiretos, isto é, aqueles que utilizam a água remanescente de usos diretos. Segundo Hall (1964) *apud* Opricovic e Djordjevic (1976), a Programação Dinâmica clássica não é aplicável no caso de usuários indiretos. Portanto, Opricovic e Djordjevic (1976)

propuseram um novo algoritmo para a obtenção da operação ótima de longo prazo considerando os usuários indiretos. Esse algoritmo foi desenvolvido em três níveis: a otimização da distribuição do volume disponível em intervalos de tempo, a alocação da água aos usuários diretos em um intervalo de tempo e a alocação da água já utilizada para os usuários indiretos. A Programação Dinâmica foi aplicada nos três níveis, tornando assim possível sua aplicação a problemas com usuários indiretos.

Fernandes *et al.* (1997) aplicaram para um mesmo caso as PD determinística e estocástica. O caso estudado foi a operação do reservatório de Guarapiranga. Para a consideração da estocasticidade do processo, as vazões afluentes foram previstas pela aplicação de modelos estocásticos para análise de séries temporais baseados na metodologia de Box e Jenkins (1976) *apud* Fernandes *et al.* (1997). Portanto, o trabalho mostrou uma fusão de técnicas de previsão de vazões e otimização.

Outra aplicação foi feita por Gobbetti *et al.* (1997) e consistiu na obtenção de políticas ótimas para a operação do reservatório de Guarapiranga usando PD estocástica. Como as vazões em um curso d'água são dependentes da aleatoriedade das precipitações, fez-se necessária a introdução dessa aleatoriedade na formulação da política ótima de operação do reservatório, utilizando-se a PD estocástica. Nesse caso, foi utilizado o programa CSU-DP, o qual só trabalha com problemas unidimensionais. Comprovou-se pela aplicação da PD estocástica, nesse caso, que as políticas ótimas obtidas permitem uma melhor distribuição das vazões oferecidas ao longo do tempo.

Méllo e Matos (1999) estudaram um caso no qual aplicou-se a PD estocástica na otimização da operação de reservatórios. A vazão afluente e a demanda de irrigação foram consideradas como variáveis aleatórias, arranjadas em um processo Markoviano de primeira ordem. As vazões afluentes ao reservatório foram consideradas um processo markoviano, no qual o estado do sistema, em qualquer estágio, depende somente do estado no estágio anterior, e das probabilidades conhecidas. Os autores compararam os resultados encontrados na aplicação de um modelo estocástico de programação linear em Méllo *et al.* (1997) e deduziram que as diferenças encontradas são inerentes à própria concepção de cada modelo. Portanto, a escolha de algum deles dependerá da particularidade de cada caso que se deseje estudar.

O problema freqüentemente encontrado no uso adequado de modelos de otimização é a falta de interação entre os usuários do modelo e os que o desenvolveram, além da falta de um tratamento subjetivo do problema com um envolvimento de elementos humanos no processo de tomada de decisão. A escolha do modelo apropriado para cada caso é dificultada pela enorme quantidade existente, além da falta de conhecimento, por parte dos usuários, da aplicabilidade de cada modelo.

#### **4.1.2. Escolha de uma técnica e justificativas**

O método de otimização matemática aplicado nesse trabalho foi a Programação Dinâmica. O problema analisado consiste na alocação mensal da água de um reservatório de múltiplos usos para diferentes usuários. A técnica de otimização matemática foi utilizada para a alocação do volume mensal disponível para diferentes usuários, de acordo com os benefícios líquidos de cada usuário, gerados pela venda dos produtos agrícolas.

A técnica de Programação Dinâmica foi escolhida por conseguir tratar problemas em vários estágios, inclusive seqüências de atividades, além de conseguir permitir a visualização de como a variação dos valores das variáveis pode influenciar no volume alocado para cada usuário. Outra vantagem é o tratamento de variáveis discretas, que é o caso do problema analisado.

#### **4.1.3. Descrição do método escolhido**

A aplicação da Programação Dinâmica pode ser resumida da seguinte forma: encontra-se a solução ótima para o primeiro estágio considerado; o ótimo do próximo estágio é relacionado com o primeiro por meio de uma função recursiva; e percorrendo-se todos os estágios é obtido o ótimo global.

Na PD, todas as decisões tomadas no passado são incorporadas no estado atual do sistema. Essa propriedade da PD é chamada de *Propriedade Markoviana*.

Pode-se desejar começar a análise do estágio final e partir para o inicial, onde a PD é dita *regressiva*, ou vice-versa, quando a PD é denominada de *progressiva*.

No caso da operação de reservatórios, sabe-se que os fenômenos tratados pela hidrologia são estocásticos, como por exemplo a vazão afluente ao reservatório. A PD determinística não considera a estocasticidade dos dados, o que em muitos casos corresponde a uma aproximação irreal. Quando se deseja considerar a aleatoriedade das vazões afluentes é necessária a aplicação da PD estocástica.

Existem dois tipos de variável na formulação da PD. A *variável de estado* corresponde ao estágio em que se encontra a análise e a *variável de decisão* é definida como a definição do roteiro de decisão, isto é, ela define o caminho a seguir em cada estágio. A mudança de estado entre dois estágios define a *função de mudança de estado*, descrita como:

$$S_i \rightarrow X_i \rightarrow S_{i+1} \quad (4.1)$$

onde:

$S_i$  – estado no estágio  $i$ ;

$X_i$  – decisão no estágio  $i$ ;

$S_{i+1}$  – estado no estágio seguinte  $i+1$

A função que relaciona o ótimo de um estágio a outro é denominada *função recursiva*. Ela é representada da seguinte forma:

$$f_n^*(S_n) = \min_{x_n} f_n(S_n, X_n) = f_n(S_n, X_n^*) \quad (4.2)$$

Onde:

$X_n^*$  - valor de  $X_n$  que minimiza ou maximiza  $f_n(S_n, X_n)$

A *função objetivo* é aquela que determina o resultado que se deseja obter com a otimização. O objetivo pode ser de minimizar ou maximizar uma dada função de retorno. Ela pode ser representada da seguinte forma:

$$f_{OBJ} = \max \text{ ou } \min [f_{RETORNO}] \quad (4.3)$$

Resumindo, a estrutura básica da PD é constituída das seguintes funções:

- função objetivo;

- função de mudança de estado;
- equações de restrição;
- função recursiva.

## **4.2. MODELOS MULTICRITÉRIO**

### **4.2.1. Revisão Bibliográfica**

A grande variedade de técnicas disponíveis para a análise de problemas com múltiplos critérios confunde os usuários, dificultando a escolha do método mais apropriado para o problema a ser analisado. Argumentos teóricos não conseguem esclarecer todas as dúvidas sobre a performance dos métodos existentes. Portanto, a realização de experimentos é muito vantajosa na determinação: da percepção do usuário sobre a efetividade da técnica; da dificuldade na aplicação da técnica; da validade dos métodos existentes; e da consideração de como a escolha do método faz diferença em termos práticos. Algumas aplicações de análise multicritério a problemas de recursos hídricos estão resumidas na tabela 4.1, seguinte.

Alguns estudos foram feitos a fim de avaliar a aplicabilidade de métodos multicritério para determinados problemas. Um desses estudos foi elaborado por Raju e Pillai (1999b) para o planejamento e desenvolvimento de uma bacia hidrográfica. Cinco métodos foram analisados, Electre II, Promethee-2, Processo de Análise hierárquica, Programação de Compromisso e EXPROM-2. O coeficiente de correlação de Spearman foi utilizado para encontrar uma correlação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos multicritério analisados. Quatro critérios relacionados com as soluções dos métodos foram utilizados na avaliação dos métodos multicritério, quais sejam: consistência dos resultados, robustez dos resultados, força da solução eficiente e confiança nos resultados.

Outro estudo, realizado por Simpson (1996), fez uma análise comparativa entre dois métodos multicritério, a Teoria de Valor Multi-atributo e o Electre II. Os dois métodos matemáticos foram investigados e suas suposições sobre os tomadores de decisão foram avaliadas. As conseqüências dessas suposições, ambas com base na técnica e no ponto de vista do analista sobre os tomadores de decisão, foram discutidas no contexto de uma análise prescritiva. A conclusão foi que existem diferenças óbvias entre os dois métodos, porém não está óbvio qual

dos dois é mais efetivo. A melhor maneira de comparar essas ferramentas é aplicá-las a um problema de decisão.

Tabela 4.1 - Aplicações de análise multicritério a problemas de recursos hídricos

Nº	Referência	Local	Problema abordado	Método adotado
1	Keeney e Wood (1977)	Bacia do rio Tisza, Hungria	Avaliação de alternativas de planos de desenvolvimento da bacia.	Teoria utilidade multiatributo
2	Nijkamp e Vos (1977)	Área de Markerwaard, Holanda	Seleção do melhor plano para o desenvolvimento da área.	Variação da análise de concordância
3	Thampapillai e Sinden (1979)	Nordeste de New South Wales, Austrália.	Aplicação a um problema de definição de uma política de desenvolvimento.	Programação linear multicritério
4	Tauxe <i>et al.</i> (1979)	Reservatório Shasta, Califórnia.	Operação de um reservatório considerando três objetivos.	Programação dinâmica multicritério
5	Cohon <i>et al.</i> (1979)	Bacia hidrográfica de Lehigh, EUA.	Planejamento de bacia hidrográfica.	Formulação da função objetivo ponderada
6	Croley II e Rao (1979)	Reservatório de Coralville, Iowa City, Iowa.	Definição da regra operativa do reservatório para controle de cheias e recreação.	Método das restrições
7	Duckstein e Opricovic (1980)	Bacia do Central Tisza, Hungria.	Projeto de um sistema de recursos hídricos em uma bacia hidrográfica.	Análise custo-efetividade e Programação de Compromisso.
8	Vedula Rogers (1981)	Bacia hidrográfica de Cauvery, Índia.	Análise do planejamento de irrigação no desenvolvimento de bacias hidrográficas.	Método das restrições
9	Yeh e Becker (1982)	California Central Valley Project (CVP), EUA.	Desenvolvimento de procedimentos práticos para análise de um sistema de reservatórios de múltiplos usos.	Método das restrições e Programação Linear e Dinâmica.
10	Gershon e Duckstein (1983)	Rio Santa Cruz, Arizona, EUA.	Foi examinado o impacto de estratégias de desenvolvimento hídrico em uma área urbanizada no semi-árido.	Electre I e II, programação de compromisso, teoria dos jogos cooperativa e teoria de utilidade multiatributo.

Tabela 4.1 - Continuação

Nº	Referência	Local	Problema abordado	Método adotado
11	Palmer e Lund (1985)	Usina termelétrica hipotética.	Projeto de uma rede de monitoramento de água para uma termelétrica.	Método baseado em uma análise “eigenvalue” e “eigenvector”.
12	Mohan Raipure (1992)	Bacia hidrográfica de Chaliyar, Índia.	Obtenção de políticas de operação ótimas de um sistema com múltiplos reservatórios e múltiplos usos.	Programação linear multicritério.
13	Hobbs <i>et al.</i> (1992).	Washington, D.C., EUA.	Estabelecimento de planos de suprimento urbano de água.	“Goal Programming”, Electre I e Funções de valores aditivos.
14	Raj, P.A. (1995)	Bacia do rio Krishna, Índia.	Planejamento dos recursos hídricos na bacia.	Electre I e II.
15	Liang <i>et al.</i> (1996)	Bacia do Alto Colorado, EUA.	Obtenção da política ótima de operação estacionária de um reservatório.	Método das restrições e método combinando modelos estocásticos e determinísticos.
16	Raju e Pillai (1999a)	Sri Ram Sagar Project, Índia.	Seleção da melhor estratégia de desenvolvimento da irrigação.	Teoria de utilidade multiatributo e Promethee II.
17	Raju e Pillai (1999b)	Bacia hidrográfica de Chaliyar, Índia.	Escolha da melhor configuração de reservatórios.	Electre II, Promethee II, Processo analítico hierárquico, Programação de Compromisso e EXPROM II.
18	Soncini-Sessa <i>et al.</i> (2000)	Lake Verbano, Itália e Suíça	Resolução de conflitos na operação de um sistema de água transnacional com múltiplos usos.	
19	Jardim (1999)	Bacia hidrográfica do rio Gravataí	Processo decisório no âmbito de comitês de gerenciamento de bacia hidrográfica	Electre I, Electre II, Programação de Compromisso e Analítico hierárquico

Foi realizado, também, por Hobbs *et al.* (1992), um estudo em planejamento de recursos hídricos no qual vários métodos multicritério foram aplicados. Pela primeira vez, foram considerados na análise a adequação do método ao problema, a facilidade na sua utilização e a sua validade. A conclusão foi que os planejadores experientes geralmente preferem métodos

mais transparentes. Nenhum dos métodos foi aceito pela maioria dos participantes e, portanto, isso mostrou que as decisões podem ser igualmente ou até mais sensíveis ao método utilizado do que à pessoa que aplica esses métodos. Isto quer dizer que uma integração entre os analistas e tomadores de decisão pode ser mais importante para o sucesso do estudo do que o método adotado.

Tauxe *et al.* (1979) aplicaram a Programação Dinâmica com Múltiplos Objetivos (PDMO) na resolução de problemas de recursos hídricos que envolvem objetivos não mensuráveis. Essa técnica possibilita a análise quantitativa de problemas multicritério que seriam dificilmente tratados com os métodos existentes. A PDMO é uma técnica que gera soluções não-inferiores para problemas não-lineares e aumenta a gama de problemas que podem ser tratados por técnicas multicritério. Isso é feito por meio da consideração de um dos objetivos como o principal e dos objetivos secundários como restrições. Existem algumas limitações na utilização desse método no que tange aos objetivos secundários, pois esses devem seguir condições específicas como: serem separáveis e cada componente dos objetivos serem definidos em termos do nível de agregação do objetivo.

Liang *et al.* (1996) fizeram uma comparação entre dois métodos de otimização para a operação de um reservatório com múltiplos objetivos. Os objetivos considerados foram a maximização da produção de energia hidrelétrica e a maximização da garantia de suprimento anual de água. Os métodos aplicados foram o método das restrições e um método que combinava a modelagem determinística e estocástica. Os resultados mostraram que a política obtida na aplicação do método combinado é melhor do que a obtida com o método das restrições.

Um estudo recente foi feito por Soncini-Sessa *et al.* (2000), no qual se utilizou a análise multicritério para resolver conflitos na operação de um sistema transnacional de água com múltiplos objetivos, nesse caso o Lago Verbano, localizado entre a Itália e a Suíça. As alternativas foram divididas em três tipos de ações: estrutural, normativa e de controle. As três ações consideram também a opção de não fazer nenhuma intervenção.

A análise foi dividida em três etapas: a formulação de um problema com múltiplos objetivos e a determinação do ótimo de Pareto para as ações de controle; a análise das ações estruturais por meio de uma análise discreta e, posteriormente, a aplicação de técnicas de decisão

multicritério; e a comparação das alternativas mais eficientes obtidas nas etapas anteriores, considerando a simples modificação dos cenários ou uma junção dos três tipos de ações.

No caso da implementação de uma análise detalhada, que deve ser feita posteriormente, os atores sociais interessados no uso da água devem ser envolvidos desde o início do processo, e estes atribuirão os pesos dos objetivos nas duas primeiras etapas, por meio da realização de um *workshop*. Na terceira etapa, é feita uma análise das duas primeiras etapas pelos grupos sociais com a realização de um outro *workshop*. Para a realização do estudo exploratório descrito no artigo, não foram realizados *workshops* e estes foram substituídos por entrevistas com alguns especialistas.

Os métodos clássicos de otimização existentes não são facilmente aplicados a problemas com objetivos não quantificáveis. A metodologia de relações de troca tem sido utilizada nesses casos por meio da comparação subjetiva dos diferentes objetivos. Esses métodos podem ser utilizados também na consideração dos riscos diretamente na determinação das regras operativas. Croley II e Rao (1979) aplicaram essa técnica na definição de relações de troca, repetindo-a para seqüências de vazões afluentes aleatórias para se avaliar o risco associado ao atendimento dos objetivos. Após a seleção da relação de troca desejada, a seqüência de operação ótima associada foi utilizada em uma otimização estocástica implícita para a identificação de regras operativas práticas.

Outra aplicação da formulação multiobjetivo foi feita por Braga e Barbosa (2001), com o objetivo de se otimizar a operação em tempo real de um sistema com múltiplos reservatórios, considerando dois objetivos: controle de enchentes e geração de energia elétrica. Foi desenvolvido um algoritmo de rede de fluxo juntamente com a formulação multiobjetivo permitindo a geração da curva de soluções não-dominadas. A aplicação da metodologia foi feita na bacia do rio Paranapanema. Os autores concluíram que o modelo mostrou-se com boa performance devido ao grande número de registros históricos das maiores cheias disponíveis para o caso escolhido.

Um estudo de caso foi feito por Raju e Pillai (1999a), no qual uma extensão estocástica do método Promethee foi utilizada, o chamado STOPROM-2, para uma avaliação da performance de um sistema de irrigação. Todos os critérios eram subjetivos e foram convertidos em valores quantitativos baseados em uma escala numérica (0-100). Os autores

chegaram à conclusão de que as incertezas na avaliação dos diferentes critérios foram abordadas eficientemente no método STOPROM-2 e o conceito de decisão em grupo pode ser efetivamente incorporado na tomada de decisão feita, utilizando-se esse método.

No estudo realizado por Goumas e Lygerou (2000), o método Promethee foi ampliado para lidar com dados de entrada difusos. O método proposto foi denominado F-Promethee. A razão pela qual esse método foi criado vem do fato de que, na maioria dos casos, os dados de entrada não podem ser definidos com um grau de precisão aceitável. Essa imprecisão é, algumas vezes, tratada como uma probabilidade, quando o modelo estocástico é aplicável. Porém, no caso da ocorrência de uma situação difusa, a teoria de números difusos é mais apropriada. Essa aplicação introduziu novas informações no processo de tomada de decisão, resultando em uma classificação mais realista, pois a imprecisão dos dados é levada em consideração.

O método da Matriz de Prioridades foi aplicado por Braga et al. (1991) no caso do conflito existente entre o setor energético e a minimização do impacto ambiental na bacia do rio Doce. Foi feita uma escolha da melhor partição de queda para a geração de energia elétrica levando em consideração os aspectos econômicos e ambientais. Concluiu-se que a utilização do método estudado e das demais técnicas de análise multiobjetivo é um instrumento interessante para permitir a negociação entre decisores para problemas desta natureza.

Os métodos Electre I e Electre II foram aplicados no planejamento de recursos hídricos em uma grande bacia hidrográfica na Índia, por Raj (1995). O ordenamento parcial das alternativas foi feito com a aplicação do Electre I, que serviu de dado de entrada para o Electre II. A conclusão do autor foi que mudanças nos pesos do Electre I não modificou consideravelmente os resultados do Electre II, e sim a mudança de escala. Foi concluído, também, que se ocorrer uma mudança pequena nos resultados do Electre I não irá afetar os resultados obtidos no Electre II, porém a mudança dos pesos provoca uma mudança significativa no Electre II. O estudo concluiu que o uso do Electre I é recomendado para o ordenamento de alternativas e o Electre II para o completo ordenamento dessas.

#### 4.2.2. Escolha do método e justificativas

A escolha da técnica mais aplicável ao caso estudado foi feita por meio de um processo de eliminação. Cada uma das classificações descritas no Capítulo 3 foi analisada de acordo com suas características, chegando-se à escolha da mais adequada. Posteriormente, dentro da classe escolhida, foi feito um levantamento das vantagens e desvantagens de cada método, o qual foi finalmente escolhido.

O objetivo do presente estudo é classificar as alternativas de tal modo que as preferências, às vezes contraditórias, dos decisores devem ser levadas em consideração, identificando, assim, soluções aceitáveis, e, não apenas, soluções não dominadas. Nesse caso, os métodos do Grupo I das classificações de Cohon e Marks (1975) e Goicoechea *et al.* (1982) não se constituem na melhor alternativa para tratamento do problema em questão.

As técnicas alocadas na 1ª Família da classificação feita por Vincke *et al.* (1992) têm a desvantagem de não considerarem a condição de incomparabilidade, a qual ocorre em problemas reais, além de estabelecer que as relações de classificação entre as ações são transitivas, o que na realidade nem sempre ocorre.

As técnicas do Grupo III de Cohon e Marks (1975), Grupo IV de Goicoechea *et al.* (1982) e da 3ª Família de Vincke *et al.* (1992) requerem um grande envolvimento do decisor no processo de solução. A interação requerida por esta classe de métodos tem a desvantagem de demandar muito tempo e, segundo Wallenius (1975) apud Goicoechea *et al.* (1982) e Cohon e Marks (1975), os decisores têm menos confiança nos algoritmos iterativos e acham esses mais difíceis de utilizar e entender do que os métodos de tentativa e erro. O problema a ser tratado, por outro lado, não possibilita um número ilimitado de consultas entre analista e decisor, o que penaliza as análises iterativas.

Por eliminação, a classe de métodos mais aplicável ao caso em estudo é, segundo a participação do decisor no processo de solução, a dos métodos de articulação de preferências a priori e, de acordo com a maneira como é feito o ordenamento das alternativas, a dos métodos de desclassificação. Além disso, no caso em questão, as alternativas a serem avaliadas são mais assimiláveis a alternativas discretas (regras de gestão), ficando, portanto, apenas os métodos discretos com articulação de preferências a priori.

Dentro do grupo dos métodos discretos com articulação de preferências a priori, e também na família dos métodos de desclassificação, têm-se os métodos da família Electre e o Promethee. Segundo Vincke *et al.* (1992), o Electre é o método de desclassificação mais conhecido e mais utilizado. No caso do problema possuir mais de um decisor, o método ELECTRE III pode ser aplicado mais de uma vez, cada qual com um conjunto de pesos atribuídos aos critérios por um decisor diferente, o que já foi feito em Cordeiro Netto *et al.* (1996). Esse método também considera outras relações além da preferência, que são a indiferença e a incomparabilidade, além da relação de preferência poder ser forte ou fraca.

O método Promethee é semelhante ao ELECTRE, consistindo em uma relação de desclassificação, porém tentando envolver conceitos e parâmetros que possuem alguma interpretação física ou econômica, mais facilmente entendida pelo decisor. Nesse método, são definidas pelo decisor diferentes funções de preferência para cada critério, dentre as seis funções propostas.

O método ELECTRE III foi escolhido por considerar outras relações de preferência entre ações, além da dificuldade do decisor em estabelecer as funções de preferência para cada critério, como é exigido no método Promethee.

#### **4.2.3. Descrição do método escolhido**

Os métodos de desclassificação surgiram nos anos sessenta com a influência de pesquisadores franceses. O primeiro a estudar o método ELECTRE foi Bouyssou, o qual é o protótipo dos métodos de desclassificação (Pomerol e Barba-Romero, 2000)

Na decisão multicritério discreta, que é o caso dos métodos da série ELECTRE, é assumida a existência de um decisor. Esse decisor será um elemento no modelo. O analista, porém, é a pessoa que realmente modela a situação em estudo e que irá fazer as recomendações para a escolha final.

O método ELECTRE é baseado na comparação de pares de alternativas discretas para cada critério. Depois da comparação, é obtido o coeficiente de concordância  $C_i(a,b)$ , o qual é associado a cada par de alternativas  $(a,b)$ . O referido coeficiente é definido como sendo a soma dos pesos dos critérios nos quais uma alternativa é melhor ou equivalente a outra.

Calculando-se o coeficiente  $C_i(a,b)$  para todos os pares possíveis de alternativas, é obtida a matriz de concordância.

Os métodos de desclassificação utilizam o conceito de discordância em complementação ao de concordância. No caso, se uma alternativa  $a$  é ao menos tão boa quanto a alternativa  $b$  para a maioria dos critérios e para nenhum critério  $a$  é substancialmente pior que  $b$ , pode-se dizer que  $a$  desclassifica  $b$ . Com a comparação dos pares de alternativas por meio do índice de discordância  $D_i(a,b)$ , é obtida a matriz de discordância.

Outro conceito que pode ser definido é a relação de indiferença. Os decisores podem ser indiferentes entre duas alternativas para um mesmo critério. Para isso, é definido um *limiar de indiferença* ( $q_i$ ) para cada critério. Quando há preferência dos decisores por uma dentre duas alternativas, diz-se que uma alternativa é preferível a outra. O limiar a partir do qual ocorre essa preferência é o *limiar de preferência* ( $p_i$ ), assumindo que  $p_i$  é sempre maior que  $q_i$ . Existe ainda o *limiar de veto* ( $v_i$ ), a partir do qual uma alternativa  $a$  é tão fortemente preferível a  $b$ , o que impede a possibilidade de  $b$  ser globalmente preferível a  $a$ .

Os limiares definidos anteriormente delimitam zonas de preferência denominadas: zona de indiferença, zona de preferência fraca e zona de preferência estrita, conforme é mostrado esquematicamente na figura 4.1, a seguir.

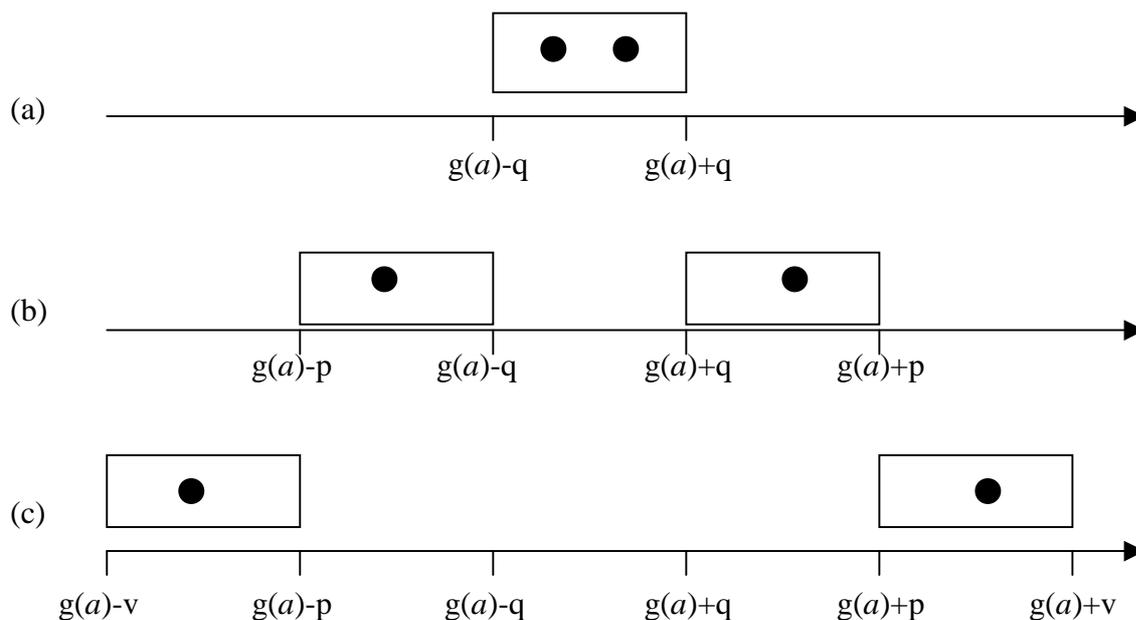


Figura 4.1 – Zonas: (a) indiferença; (b) preferência fraca; (c) preferência estrita (adaptado de Maystre *et al.*, 1994).

As relações de preferência de uma alternativa  $a$  em relação à alternativa  $b$  podem ser esquematicamente definidas como:

$a I b$  – o decisor é indiferente entre as duas alternativas;

$a Q b$  – a alternativa  $a$  é fracamente preferível em relação a alternativa  $b$ ;

$a P b$  – a alternativa  $a$  é fortemente preferível em relação a alternativa  $b$ ;

$a V b$  – a alternativa  $b$  nunca pode ser globalmente melhor do que a alternativa  $a$ .

Analisando estas relações do ponto de vista dos limiares de preferência, tem-se o que segue, para um critério de preferência crescente (quanto maior, melhor).

$$a I b \rightarrow -q_i \leq g(a) - g(b) \leq q_i; \quad (4.4)$$

$$a Q b \rightarrow q_i < g(a) - g(b) \leq p_i; \quad (4.5)$$

$$a P b \rightarrow p_i < g(a) - g(b) \leq v_i; \quad (4.6)$$

$$a V b \rightarrow v_i < g(a) - g(b). \quad (4.7)$$

Quando  $a Q b$ ,  $a P b$  e  $a V b$ , dizemos que  $a$  é melhor que  $b$  ou  $a S b$ . A representação gráfica dessas relações encontra-se na figura 4.2.

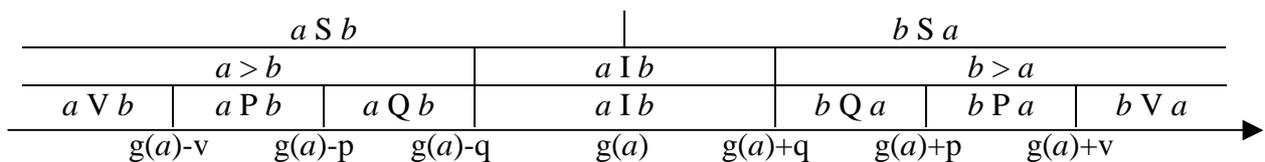


Figura 4.2 - Relações de preferências (Yu e Roy, 1992 *apud* Generino, 1999)

O índice de concordância  $C_i(a,b)$  é definido, para um critério de sentido de preferência crescente, como sendo:

$$C_i(a,b) = 0 \Leftrightarrow p_i < g_i(a) - g_i(b) \quad (4.8)$$

$$0 < C_i(a,b) < 1 \Leftrightarrow q_i < g_i(a) - g_i(b) \leq p_i \quad (4.9)$$

$$C_i(a,b) = 1 \Leftrightarrow g_i(a) - g_i(b) \leq q_i \quad (4.10)$$

A figura 4.3 a seguir mostra graficamente a construção do índice de concordância.

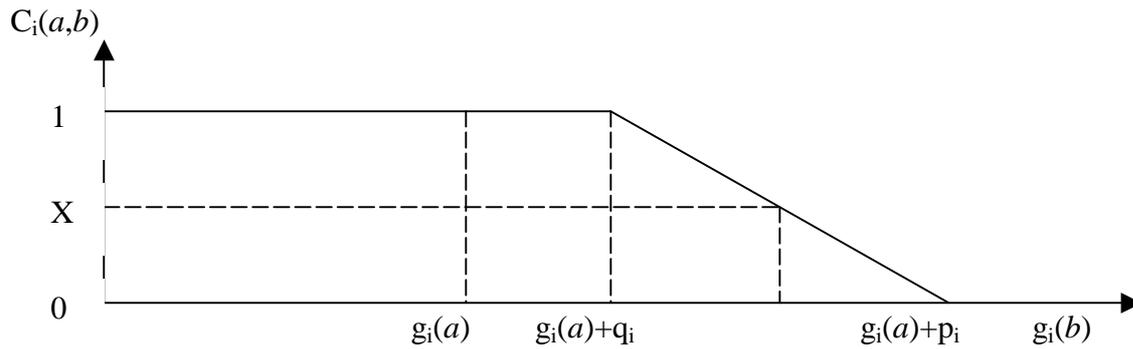


Figura 4.3 – Construção do índice de concordância (Maystre *et al.*, 1994)

A intensidade da discordância de um critério pode ser obtida por meio do índice de discordância  $D_i(a,b)$ , que pode ter os seguintes valores:

$$D_i(a,b) = 1 \Leftrightarrow v_i < g_i(a) - g_i(b) \tag{4.11}$$

$$0 < D_i(a,b) < 1 \Leftrightarrow p_j < g_i(a) - g_i(b) \leq v_i \tag{4.12}$$

$$D_i(a,b) = 0 \Leftrightarrow g_i(a) - g_i(b) \leq p_i \tag{4.13}$$

A figura 4.4 a seguir mostra graficamente a construção do índice de discordância.

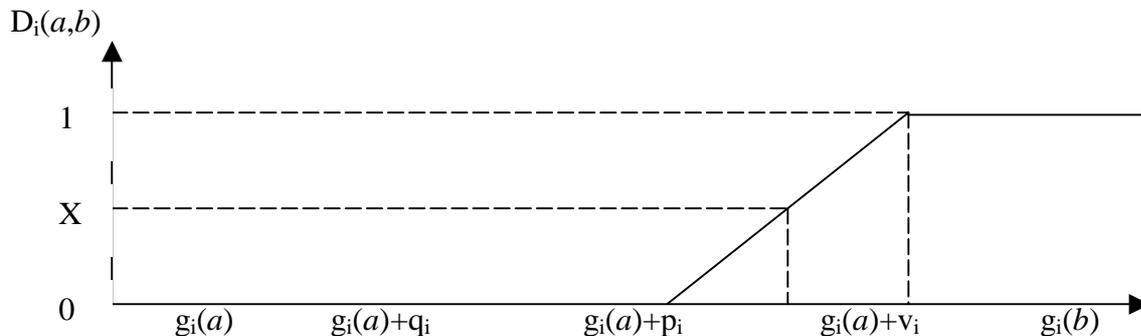


Figura 4.4 – Construção do índice de discordância (Maystre *et al.*, 1994)

Uma relação de desclassificação depende muito dos pesos atribuídos aos critérios e dos índices de indiferença, preferência e veto, atribuídos pelos decisores. Portanto, a correta atribuição desses índices é primordial para a obtenção da solução do problema.

## 5. METODOLOGIA DA PESQUISA

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de três atividades iniciais, que se desenrolaram concomitantemente:

- 1 – Levantamento dos dados referentes ao caso de estudo
- 2 – Pesquisa das metodologias de avaliação existentes
- 3 – Caracterização do problema e da área de estudo

A **primeira atividade** consistiu do levantamento dos dados hidroclimatológicos necessários para a definição da disponibilidade hídrica mensal do reservatório. A série de vazões históricas disponível no local não era suficiente para permitir essa definição. Para obter-se uma série de vazões mensais mais longa foi aplicado o modelo Chuva-Vazão IPH-MEN (Tucci, 1998). Os dados obtidos no modelo foram testados pela comparação dos dados do sistema por meio do balanço hídrico do reservatório.

A **segunda atividade** foi a pesquisa das principais metodologias de avaliação existentes e aplicáveis a problemas de recursos hídricos. Essa pesquisa foi dividida em dois temas: técnicas de análise monocritério e multicritério. No âmbito do primeiro tema, foram abordadas as técnicas de análise monocritério existentes e aplicáveis para o caso de otimização do uso da água de reservatórios com múltiplos usos, analisando trabalhos já elaborados com as diferentes metodologias existentes e aplicáveis para o caso em questão.

O segundo tema abordado refere-se aos métodos de análise multicritério, em que outros aspectos, além do econômico-financeiro, são levados em consideração na tomada de decisão, com análise de exemplos de aplicações na definição de regras operativas de reservatórios. Procurou-se identificar agrupamentos das técnicas de acordo com as suas características, feitos por alguns autores.

Na **terceira atividade**, foi feita uma caracterização tanto do problema de decisão como da área onde se desenvolveu o estudo de caso. Foram levantadas as características físicas do local, os dados técnicos da barragem do Bico da Pedra, e os agentes interessados na gestão da

água na bacia. Foram identificados, também, os usuários de água, com os correspondentes volumes demandados, tipo de cultura, área irrigada, benefícios com a produção, etc.

Com base nas atividades desenvolvidas, foram escolhidos os métodos a serem aplicados ao problema, justificando a escolha por meio do levantamento da adequação do método ao caso em questão.

Para determinar a disponibilidade hídrica mensal do reservatório, foram traçadas curvas que relacionam a cota do reservatório com a disponibilidade mensal de água, cada uma delas para uma garantia de disponibilidade em todo período considerado. Com isso, foi aplicada uma técnica de otimização matemática monocritério, tendo como objetivo a maximização dos benefícios decorrentes da operação do reservatório, e uma técnica multicritério, onde são considerados outros objetivos, além do econômico.

De posse dos dados, foram definidas a função-objetivo e as restrições ao problema, no caso da aplicação da técnica de otimização monocritério, tendo como uma das restrições o balanço hídrico. No caso da análise multicritério, foram propostos critérios de decisão e alternativas de gestão. A escolha dos atores do processo decisório teve como base entrevistas feitas com representantes de cada usuário envolvido e cada um deles determinou a importância relativa dos critérios de acordo com o seu ponto de vista.

Feito isso, foram aplicadas as técnicas escolhidas para o caso da Barragem do Bico da Pedra, com posterior comparação dos resultados obtidos pelos dois tipos de abordagem, considerando-se os diversos cenários adotados. O resultado disto foi a definição de uma melhor alternativa para a alocação da água do reservatório para os seus diversos usos. Uma análise de sensibilidade foi feita para testar a robustez da solução, no caso da análise multicritério.

A representação gráfica da metodologia encontra-se na figura 5.1, a seguir.

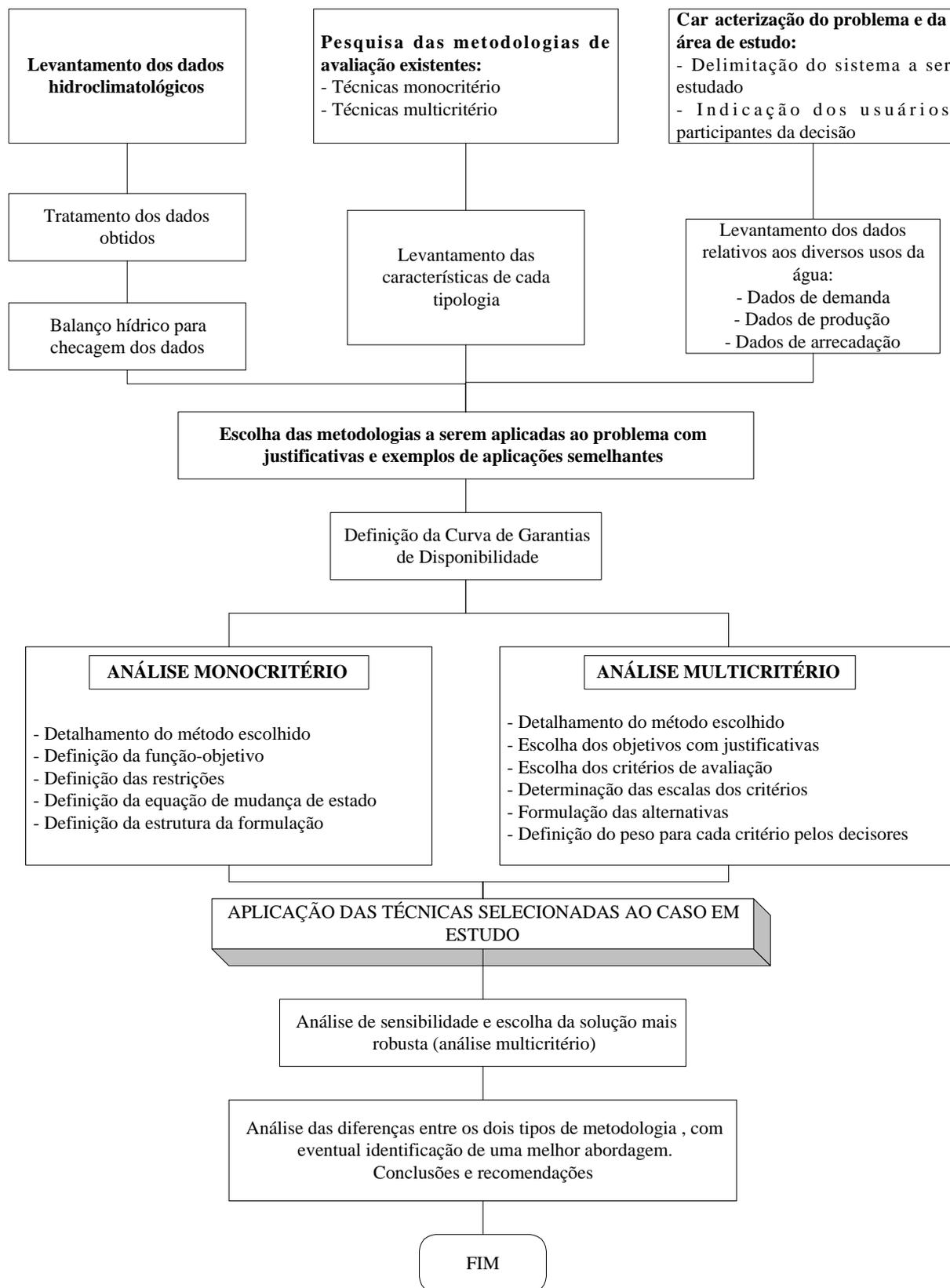


Figura 5.1 - Representação esquemática da metodologia

## 6. CASO DE ESTUDO

A bacia estudada foi a do rio Gorutuba, o qual tem suas nascentes na Serra do Espinhaço, município de Francisco Sá em Minas Gerais e possui 213,23 km de extensão até a sua foz no rio Verde Grande que, por sua vez, deságua no rio São Francisco. De acordo com o MMA (1998), a bacia do rio Gorutuba é a principal sub-bacia do rio Verde Grande, com área total de 9.395,51 km<sup>2</sup>, contribuindo com 28,4% do total do potencial hídrico desse rio. A figura 6.1 mostra um mapa da bacia do rio Gorutuba, com suas principais características.

Antes da construção da barragem do Bico da Pedra, o vale do Gorutuba, tendo Janaúba como sua principal cidade, era castigado pelas secas prolongadas. A construção da barragem do Bico da Pedra foi iniciada pelo DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra a Seca e concluída em 1977, depois de passar à responsabilidade da CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco.

A barragem do Bico da Pedra, além de conter as enchentes do rio Gorutuba, regulariza sua vazão, com a água aproveitada para irrigação a jusante. Primeiramente, ela foi projetada para atender o Projeto Gorutuba, que continha uma área irrigável da ordem de 15 mil hectares. Além disso, foi prevista a liberação de uma vazão ecológica para o rio.

Inicialmente, o Projeto Gorutuba foi concebido contendo duas áreas distintas de exploração agrícola: a área da margem esquerda e da margem direita. Seria captada a vazão máxima de 6,0 m<sup>3</sup>/s para cada uma dessas áreas. Porém, devido à expansão da cidade de Janaúba, o projeto para a área localizada na margem esquerda do rio Gorutuba não foi implantado. O início da operação do Projeto Gorutuba ocorreu em 1980 e o mesmo foi emancipado em 1986, passando a ser operado pela COVAG - Cooperativa do Vale do Gorutuba e, posteriormente, desde 1993, pelo Distrito de Irrigação do Projeto Gorutuba – DIG. No ano de 1999, o Projeto Gorutuba possuía aproximadamente 4.818 ha em operação, sendo 2.528 ha de pequenos irrigantes e 2.290 ha de empresários, porém a área total cultivada era de apenas 3.691 ha (CODEVASF, 2000).

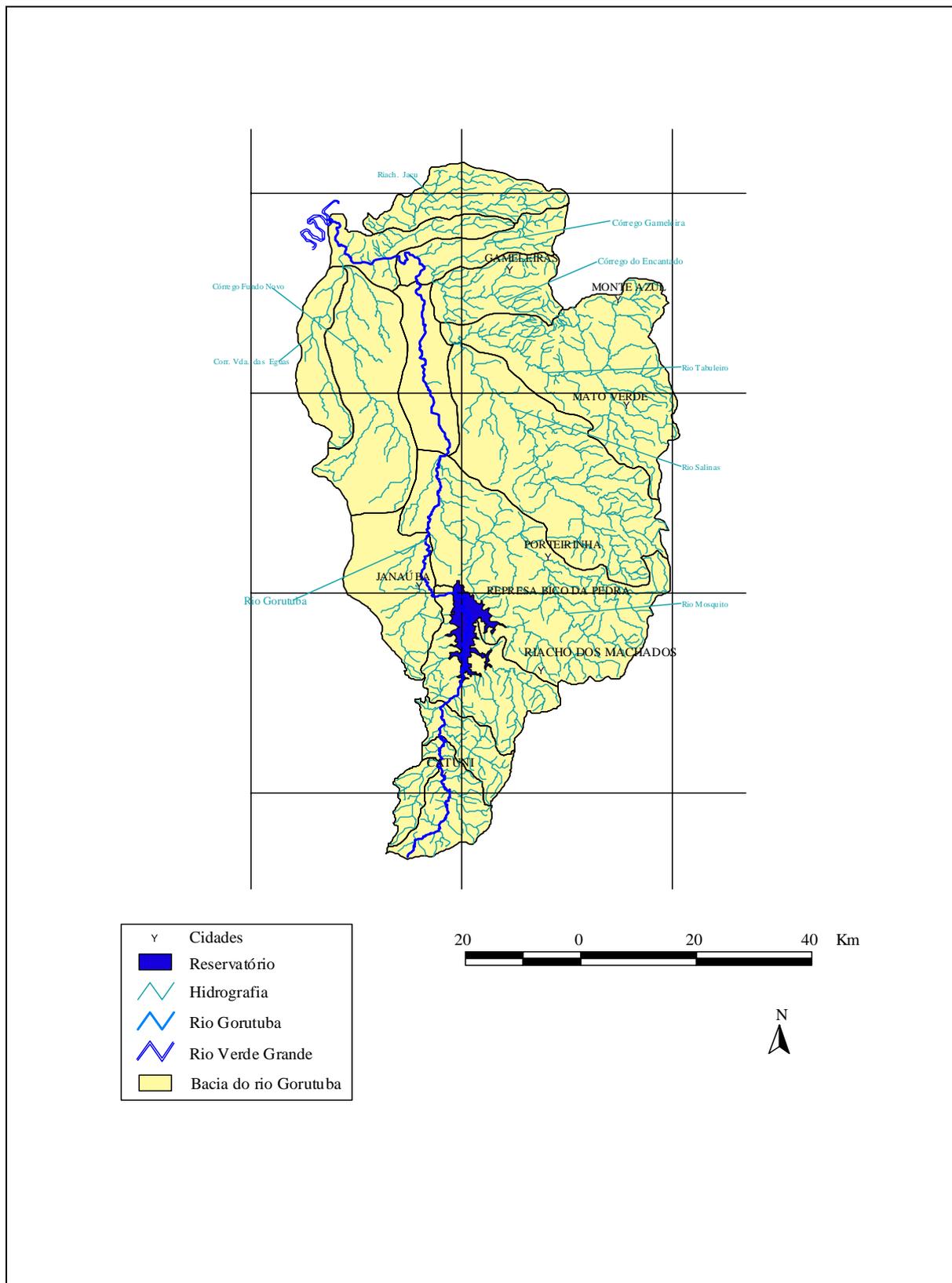


Figura 6.1 - Mapa da Bacia do Rio Gorutuba

Posteriormente, em 1988, foi criado o Perímetro de Irrigação Lagoa Grande, localizado na margem esquerda do rio, a jusante da cidade de Janaúba, administrado pela ASSIEG – Associação dos Irrigantes da Margem Esquerda do Rio Gorutuba, com uma área total de 1.660 ha, somente com lotes empresariais, sendo que, em 1999, apenas 1.119 ha estavam sendo cultivados (CODEVASF, 2000). A captação para esse projeto é feita diretamente do rio Gorutuba, por meio de bombas. Portanto, a vazão liberada no rio teve que aumentar devido a essa demanda adicional do Projeto.

### Dados técnicos da barragem

A barragem do Bico da Pedra localiza-se no município de Janaúba, nas coordenadas 15° 49' S e 43° 14' W, e barra o rio Gorutuba, afluente do rio Verde Grande, num local conhecido como Boqueirão da Gameleira, a 7 km da cidade de Janaúba. O rio Gorutuba percorre uma distância de 88,55 km até a barragem, vencendo um desnível de 575 m, com uma área de drenagem de 1.620,04 km<sup>2</sup>. A jusante da barragem, o rio Gorutuba percorre uma distância de 124,68 km até a sua foz no rio Verde Grande, tendo como principais afluentes os rios Mosquito e Salinas.

O objetivo principal da barragem é o abastecimento de água para irrigação, tendo outros usos como o abastecimento da cidade de Janaúba (prioridade), a piscicultura, além de recreação e lazer. Os dados técnicos da barragem estão apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Dados técnicos da barragem do Bico da Pedra

Discriminação	Valores
Área da bacia hidráulica (reservatório)	10.000 ha
Volume máximo acumulado	705,6 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume útil	376,8 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume morto	328,8 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Cota máxima normal de operação	553,00 m
Cota mínima de operação	543,00 m

Fonte: CODEVASF (1991)

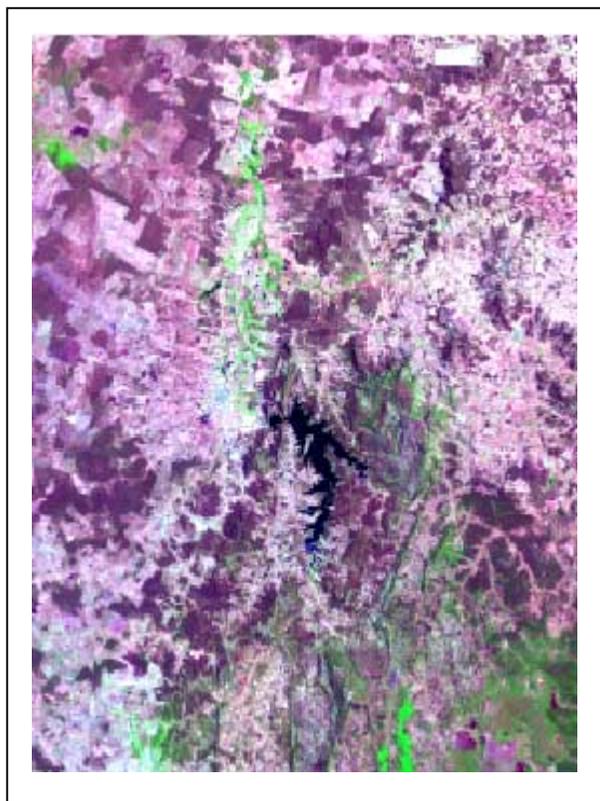
- Conflitos pelo uso da água

A bacia do rio Gorutuba é caracterizada pela ocorrência de solos com alto potencial para irrigação, porém com graves limitações de disponibilidade hídrica. O crescimento da demanda na região deve-se principalmente à implantação da barragem do Bico da Pedra, a qual aumentou significativamente a disponibilidade hídrica da região, e à aptidão agrícola dos solos da região, cerca de 450.000 ha, acarretando maior ocupação da bacia, conforme pode ser avaliado na figura 6.2, a seguir, onde a área cultivada corresponde à cor verde a jusante da barragem. Porém, ocorreu, gradativamente, uma redução desta disponibilidade, fazendo com que surgissem conflitos significativos entre os usuários.

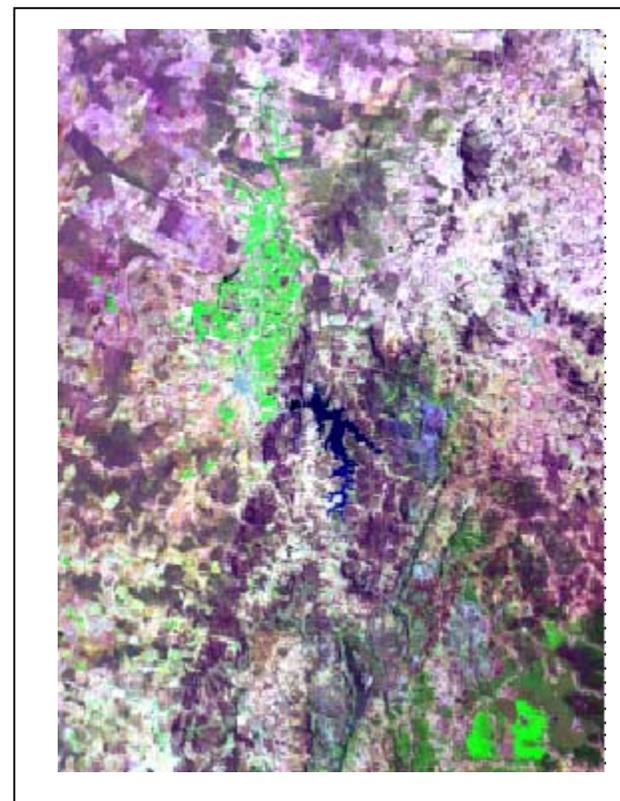
Segundo o estudo realizado pela CODEVASF (CODEVASF, 1991), a água subterrânea é pouco utilizada e limita-se apenas a abastecimentos localizados, devido à pouca vazão disponível nos poços e à má qualidade da água (salinização).

A perenização do rio Gorutuba fez com que surgisse o uso indiscriminado da água nas suas margens, onde agricultores individuais expandiram a agricultura irrigada adquirindo conjuntos motor-bomba e utilizando técnicas diversas, que vão desde a inundação até o pivô central. Um agricultor chegou, até, a construir uma barragem na própria calha do rio. Essas atividades de caráter individual aumentam a possibilidade de conflitos sociais decorrentes da competição pelo uso da água, que no caso é escassa.

Os primeiros registros de conflito de usuários surgiram em fins de 1988. Estes conflitos podem ser englobados em duas categorias principais: entre irrigantes (incluindo irrigação privada e pública) e entre irrigantes e outros usuários. Os conflitos continuaram durante todo o ano de 1989, com a CODEVASF e a COVAG – Cooperativa do Vale do Gorutuba, responsáveis pela operação da barragem do Bico da Pedra, sendo pressionadas para que liberassem mais água para atender aos usos a jusante.



1986



1999

Figura 6.2 – Evolução das áreas irrigadas (1986 – 1999)

No trecho do rio Gorutuba a jusante da barragem do Bico da Pedra, encontra-se o maior número de irrigantes, integrantes do Projeto Gorutuba e Lagoa Grande ou irrigantes privados. No médio Gorutuba, a montante de sua confluência com o rio Salinas, não há grande quantidade de irrigantes e eles se encontram distribuídos ao longo de todo o trecho. No baixo Gorutuba, após a confluência com o rio Salinas até a sua foz no rio Verde Grande, existe uma quantidade inexpressiva de irrigantes porque, nesse trecho, o rio torna-se intermitente. A distribuição dos irrigantes pode ser visualizada na figura 6.3, a seguir. A tabela em anexo mostra o cadastro de irrigantes a jusante da barragem do Bico da Pedra realizado pela Ruralminas em 1996 e 1997, os quais foram posteriormente consolidados em um banco de dados atualizado em 5 de janeiro de 2000 (Ruralminas, 2000), contendo diversas informações como a vazão captada, área irrigada, cultura, técnica de irrigação, etc.

Em estudo realizado pelo CETEC (1995), foi constatada a existência de áreas com alto grau de fragilidade quanto às disponibilidades hídricas superficiais e concluiu-se que se forem mantidas as condições atuais de controle e de oferta de água e se houver um crescimento na demanda, haverá risco de aumento do déficit hídrico na bacia. Nesse contexto, deve-se ressaltar a importância do papel dos reservatórios de regularização da oferta de água da região.

- Estrutura da Gestão dos Recursos Hídricos

O caráter multisetorial da estrutura gerencial dos diversos usos na bacia faz com que seja necessária a divisão da estrutura da gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Gorutuba em dois enfoques. O primeiro consiste na identificação dos atores privados ou públicos interessados na gestão da água, isto é, aqueles que desenvolvem atividades econômicas na bacia ou que atuam na administração da água. O outro enfoque é o estabelecimento do relacionamento entre esses diversos atores.

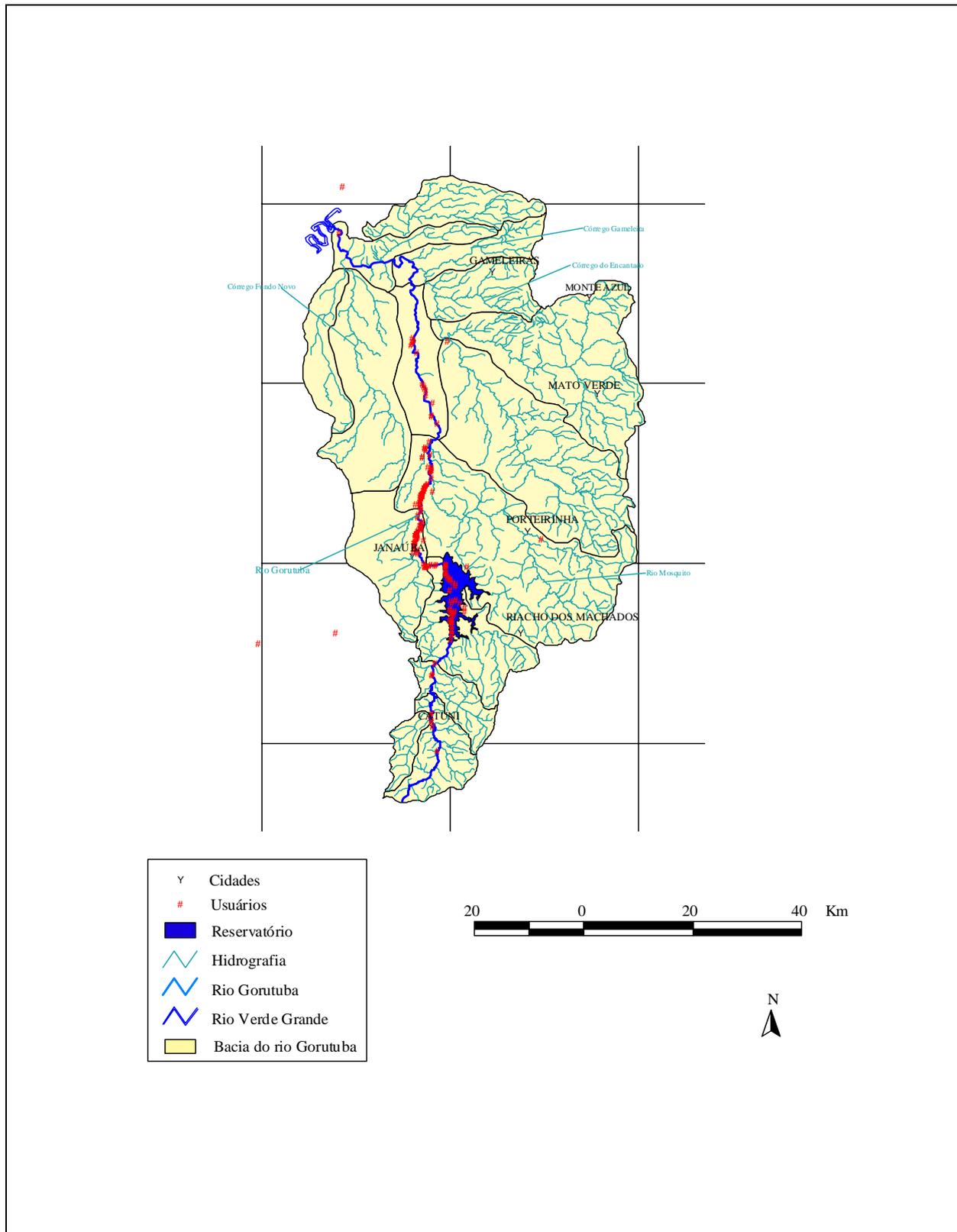


Figura 6.3 - Localização dos Usuários da Bacia do rio Gorutuba

A multiplicidade de entidades públicas e privadas responsáveis pela fiscalização de uma série de normas de caráter setorial faz com que não haja uma ação participativa com vistas a um planejamento estratégico integrando todos os usos da água e atores interessados na gestão.

No Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Verde Grande (MMA, 1998), foi feito um levantamento dos diversos órgãos públicos que têm poder decisório sobre a utilização dos recursos hídricos na bacia do rio Verde Grande, na qual foi identificada uma pluralidade de interesses conflitantes onde, sem uma estratégia de planejamento integrado, esses interesses serão dificilmente conciliáveis. A bacia do rio Gorutuba possui a maior concentração de irrigantes da bacia do rio Verde Grande, tanto do Projeto Gorutuba quanto de irrigantes privados e, portanto, possui uma grande quantidade de entidades públicas e privadas interessadas na gestão da água.

No referido estudo, os grupos de interesse foram divididos em três grupos distintos: associações de pequenos produtores rurais, distritos de irrigação e representação da população urbana. A população urbana tem representatividade pouco eficaz, visto que prevalece a visão setorial do uso da água representada pelas instâncias públicas sem que a sociedade civil, tendo propostas de intervenção global, seja consultada. Um exemplo disto é o fracasso do SEEIVERDE – Subcomitê Executivo de Estudos Integrados da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande, constituído em 1991, que se tornou uma entidade enfraquecida e com inexpressiva participação dos usuários. Desde 1997, foi constituído o CEIVERDE – Comitê de Gestão dos Recursos Hídricos da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande, o qual substituiu o até então SEEIVERDE.

O CEIVERDE é constituído por representantes da União, do Executivo de cada estado integrante da sub-bacia, da Administração Municipal da região da sub-bacia, de usuários das águas e da sociedade civil organizada, e tem o objetivo de disciplinar, planejar e monitorar o uso dos recursos hídricos da sub-bacia do rio Verde Grande, além de defender as questões ambientais e recuperar e preservar os recursos naturais. Existem diversas associações na bacia do rio Verde Grande, identificadas no Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Verde Grande (MMA, 1998), e a maior parte delas se encontram na bacia do rio Gorutuba, dentre as quais se destaca a categoria associação de produtores rurais.

O Comitê da Bacia do Rio Verde Grande está sendo formado nos moldes da Lei nº 9.433/97. Sua documentação foi aprovada pela Diretoria da Agência Nacional de Águas - ANA e está sendo enviada para análise e aprovação do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH. A formação deste comitê está sendo viabilizada pela ação da ANA, que criou um escritório com sede na cidade de Janaúba, o qual conduz os trabalhos de articulação com os diversos atores existentes na bacia.

Os distritos de irrigação atualmente existentes na bacia do rio Gorutuba são o Distrito de Irrigação do Gorutuba - DIG, formado no ano de 1993 e constituído de 424 sócios, e a ASSIEG - Associação dos Irrigantes da Margem Esquerda do Rio Gorutuba, constituída em 1986 e atualmente com 53 associados. As associações de produtores rurais identificadas no Perímetro Irrigado do Gorutuba constam da tabela 6.2.

De acordo com levantamento feito na ocasião da elaboração do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Verde Grande (MMA, 1998), reunindo entidades interessadas na gestão da água da bacia do rio Verde Grande, os principais anseios da sociedade organizada da bacia são: estabelecimento de um controle e ordenamento efetivo no uso da água: regulamentação e gestão; e correção da situação do uso da água, já que os grandes e fortes usuários causam prejuízo para um número maior de pequenos usuários.

Um estudo feito pela CODEVASF (1991) fez algumas recomendações, e entre elas estão o aumento da oferta de água, a redução da demanda de água e a racionalização do uso da água, por meio da otimização da operação da barragem do Bico da Pedra. Essa última recomendação consiste na operação da barragem seguindo critérios pré-estabelecidos, visando otimizar ao máximo o uso da água, isto é, a sua liberação não pode ficar sujeita a critérios políticos, pessoais, etc.

Tabela 6.2 - Associações de produtores rurais identificadas no Perímetro Irrigado do Gorutuba

Município	Organização	Data Const.	Nº Sócios
Nova Porteirinha	As. de Moradores e Prod. Rurais da Col. Matinha	07/05/99	20
Nova Porteirinha	Assoc. Comunitária Ação e Trabalho Colonização I	08/06/97	20
Nova Porteirinha	Assoc. do Grupo União Trabalhadora Colonização I	01/06/90	20
Nova Porteirinha	Assoc. Grupo Feminino Prom. Soc. Col. Algodões	13/04/97	15
Nova Porteirinha	Assoc. Peq. e M. Prod. Rurais Colonização Caraíbas	16/09/96	30
Nova Porteirinha	Assoc. Peq. Prod. Rurais Colonização Canafístula	12/09/93	23
Nova Porteirinha	Assoc. Peq. Prod. Rurais Região Colonização Ceará	18/01/94	35
Nova Porteirinha	Assoc. Pequenos Produtores Rurais Colonização II	20/06/90	13
Nova Porteirinha	Associação Comunitária Rural Cosme Damião	02/10/95	12
Nova Porteirinha	Associação Comunitária Rural Nova Esperança	31/08/95	28
Nova Porteirinha	Associação Comunitária Rural Progresso	04/07/96	65
Nova Porteirinha	Associação Comunitária Rural Senhorinho Ferreira	06/12/95	16
Nova Porteirinha	Associação dos Moradores da Colonização I	22/12/93	65
Nova Porteirinha	Associação Pequenos Prod. Rurais Colonização III	03/09/82	30
Nova Porteirinha	Associação Pequenos Prod. Rurais de Matinha	08/08/90	13
Janaúba	Assoc. Central dos Fruticultores do Norte de Minas	27/03/93	13
Nova Porteirinha	Assoc. Comum. Prod. R. Vila Floresta Proj. Gorutuba	24/01/90	20
Nova Porteirinha	Assoc. Comum. Rural Peq. Prod. do Proj. Gorutuba	22/06/82	22
Nova Porteirinha	Assoc. Peq. Prod. Rurais Indep. do Vale Gorutuba	22/04/93	43
Nova Porteirinha	Coop. Agríc. de Irrigação do Vale do Gorutuba Ltda	17/04/80	1.409
Janaúba	Cooperativa de Crédito Rural Vale do Gorutuba Ltda	07/11/88	1.029
Janaúba	Cooperativa dos Fruticultores de Janaúba Ltda	18/04/96	27
Janaúba	Cooperativa Mista dos Produtores de Janaúba Ltda	28/11/68	2.219
Nova Porteirinha	Coorp. Dos Hortifrutigranjeiros Proj. Gorutuba Ltda	08/07/93	86

Fonte: CODEVASF

## 7. TRATAMENTO DOS DADOS HIDROLÓGICOS E DE DEMANDA

Há pouca disponibilidade de dados hidroclimatológicos na bacia do rio Gorutuba, principalmente de vazão, como ocorre na maioria das bacias brasileiras. Só existe uma estação fluviométrica (Janaúba), porém esta se encontra logo a jusante da barragem do Bico da Pedra. O período dos dados de vazão desta estação é de 1969 a 1988, porém com muitas falhas. Como a construção da barragem do Bico da Pedra terminou em 1977, pode-se considerar que o período de dados anterior ao fechamento da barragem traduz o comportamento natural do rio, antes da vazão ser regularizada. Porém, devido ao grande número de falhas, o período de dados de vazão média realmente utilizado neste trabalho foi de 1970 a 1973, conforme a tabela 7.1 seguinte.

Tabela 7.1 – Vazão média mensal da estação Janaúba (m<sup>3</sup>/s)

Anos	Meses											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1970	21,80	6,65	2,73	1,27	1,15	1,15	1,15	1,12	0,75	12,60	13,20	2,94
1971	5,00	2,27	1,67	1,44	1,44	0,42	0,37	0,32	0,58	1,46	67,20	42,80
1972	4,17	3,40	6,68	3,49	0,76	0,49	0,34	0,20	0,22	8,55	14,30	12,90
1973	5,89	6,11	15,00	2,68	0,80	0,49	0,32	0,28	0,26	1,47	14,30	4,10

Fonte: ANEEL

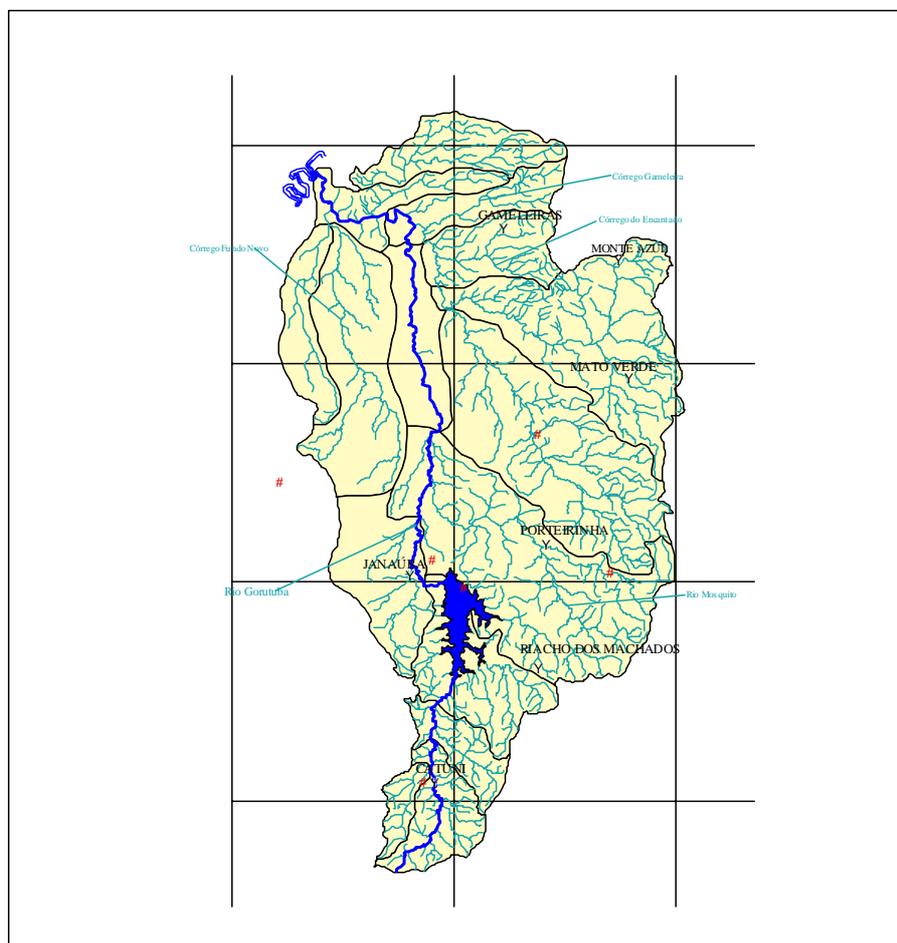
Existem várias estações pluviométricas na bacia do rio Gorutuba, com períodos diferentes de dados. Foram utilizados seis postos pluviométricos com período de dados de 1970 a 1973, conforme tabela 7.2, como entrada de um modelo chuva-vazão, com o objetivo de gerar séries mais longas de vazão. A figura 7.1 mostra a distribuição espacial dos seis postos pluviométricos na bacia do rio Gorutuba.

Os dados necessários para o balanço hídrico do reservatório, como por exemplo demanda, evaporação, cotas da barragem, foram obtidos para o período de 1988 a 1999. Portanto, a série foi gerada pelo modelo chuva-vazão para o mesmo período, utilizando-se dados de três estações pluviométricas na bacia do rio Gorutuba, os quais se encontram na tabela 7.3, a seguir. A figura 7.2 mostra a distribuição espacial destas três estações na bacia.

Tabela 7.2 – Precipitação média mensal 1970 – 1973 (mm)

Anos	Meses											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Estação Barreiro do Jaíba (Lat: 15°37'00", Long: 43°35'35")												
1970	239,00	24,20	55,50	54,10	0,00	0,00	0,00	0,00	22,00	185,00	193,90	48,00
1971	17,50	70,20	31,20	35,10	0,00	0,00	0,00	0,00	11,60	57,20	312,40	192,20
1972	12,00	59,00	129,80	61,00	6,50	0,00	2,80	0,00	11,00	91,80	104,90	268,30
1973	67,30	58,40	297,50	26,60	0,00	0,00	0,20	0,00	26,10	57,60	326,60	110,40
Estação Catuni (Lat: 16°14'00", Long: 43°17'07")												
1970	296,80	60,60	56,10	12,00	28,10	11,90	10,00	7,10	23,20	119,40	286,00	72,40
1971	12,00	34,00	0,00	0,00	43,00	0,00	0,00	7,10	79,00	86,10	304,80	252,60
1972	82,20	71,30	219,70	149,90	50,40	20,20	0,00	0,00	30,10	108,90	273,10	250,70
1973	95,00	95,10	196,70	22,10	14,00	32,20	0,00	0,00	38,00	108,90	129,80	125,80
Estação Gorutuba (Lat: 15°50'00", Long: 43°12'12")												
1970	163,40	54,800	17,80	24,80	0,00	0,00	0,70	1,20	28,40	164,70	239,10	74,30
1971	16,20	4,400	99,30	73,50	0,00	2,00	0,00	0,00	14,00	79,80	279,50	152,90
1972	90,30	2,400	133,20	80,80	1,00	0,00	1,00	0,00	4,00	122,80	200,70	202,20
1973	87,00	65,80	248,90	4,80	2,20	0,00	0,00	0,00	55,60	93,20	166,40	66,80
Estação Janaúba (Lat: 15°46'32", Long: 43°16'16")												
1970	154,90	13,60	9,80	9,80	0,00	0,00	0,00	0,00	13,80	239,40	187,00	6,50
1971	30,70	33,90	62,40	27,70	0,00	0,00	0,00	0,00	20,90	30,50	277,40	137,40
1972	75,20	6,40	115,60	91,80	0,00	0,00	0,80	0,00	4,40	38,00	154,40	179,30
1973	119,50	87,10	230,40	1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	44,20	61,80	250,60	87,10
Estação Pai Pedro (Lat: 15°31'00", Long: 43°03'03")												
1970	173,60	56,00	32,40	5,80	0,00	0,00	0,00	0,00	17,90	179,40	480,20	173,20
1971	110,60	12,30	38,60	36,20	0,00	25,70	0,00	0,00	22,50	119,50	558,60	170,60
1972	58,40	56,40	263,60	71,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,00	274,40	229,60
1973	46,40	102,80	210,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,60	20,80	222,00	75,80
Estação Serranópolis (Lat: 15°48'00", Long: 42°53'53")												
1970	192,90	52,40	21,0	15,80	0,60	0,90	0,00	1,70	39,00	295,60	374,80	86,60
1971	62,00	1,20	55,1	31,80	2,00	0,00	0,00	0,00	16,30	124,80	347,20	68,90
1972	26,40	20,80	164,3	92,50	6,60	6,30	1,30	0,00	1,80	128,80	239,70	200,20
1973	46,40	70,60	132,4	10,30	0,00	0,00	0,00	0,00	50,20	73,40	230,40	60,70

Fonte: ANEEL



Fonte: CODEVASF

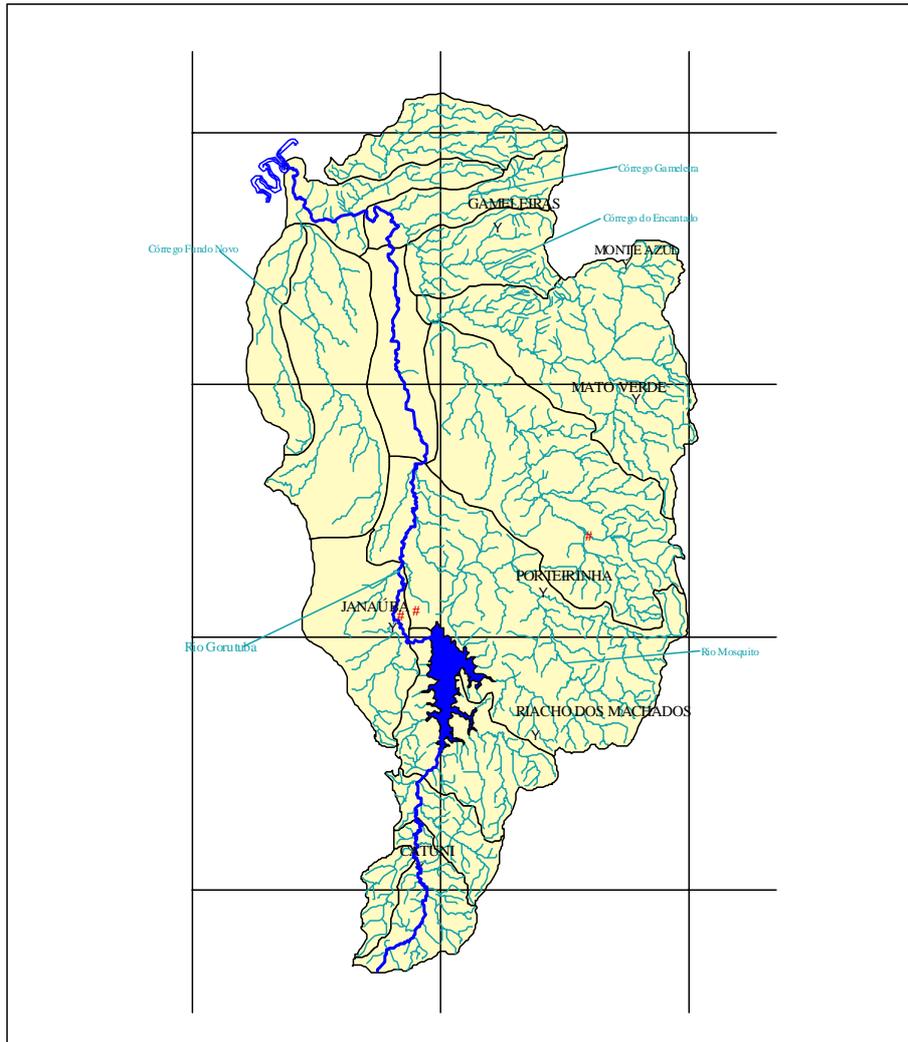


Figura 7.1 – Postos pluviométricos 1970-1973

Tabela 7.3 – Dados pluviométricos 1988 – 1999 (mm)

Anos	Meses											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Estação Janaúba 83395 (Lat: 15°47'00", Long: 43°18'00")												
1988	38,60	78,00	106,20	32,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	88,90	90,50	222,90
1989	85,80	29,40	88,20	12,70	21,00	28,20	6,40	0,00	41,40	48,60	182,90	434,50
1990	3,50	129,70	15,70	10,00	2,50	0,00	0,00	9,40	8,50	34,90	93,70	205,20
1991	204,30	54,20	58,20	23,30	16,60	0,00	0,10	0,00	16,00	32,20	200,30	217,60
1992	453,60	173,90	37,10	20,10	12,80	0,00	0,00	54,30	1,70	75,60	152,60	331,20
1993	40,00	44,40	1,80	45,50	2,20	0,00	0,00	0,00	18,10	18,80	54,70	141,10
1994	227,70	39,90	152,00	27,90	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,60	146,20	59,50
1995	130,40	62,40	91,30	61,60	1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	77,10	342,90	240,40
1996	9,40	41,10	51,00	51,00	2,40	0,00	0,00	0,00	8,80	102,30	295,60	82,90
1997	142,80	67,30	247,70	39,80	3,80	22,00	0,40	0,00	8,40	42,10	88,70	117,60
1998	151,80	167,80	16,00	0,50	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	52,00	259,40	214,40
1999	126,50	37,20	84,60	6,00	2,40	0,00	1,00	0,10	4,10	45,80	318,00	217,00
Estação Janaúba (Lat: 15°46'32", Long: 43°16'16")												
1988	40,00	69,20	88,40	37,10	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	76,80	68,90	194,80
1989	65,70	38,70	89,20	13,60	11,80	34,50	2,00	0,00	38,00	45,50	191,00	492,10
1990	3,10	154,30	11,80	5,70	2,00	0,00	14,00	0,00	6,00	19,60	130,80	219,00
1991	172,80	86,60	74,00	9,30	11,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,90	118,60	155,20
1992	434,80	172,50	25,00	43,00	13,00	0,00	0,00	80,00	0,00	88,10	119,60	346,90
1993	37,10	43,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,30	49,00	162,40
1994	188,50	12,30	167,70	29,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70	159,30	80,10
1995	113,20	95,30	28,50	58,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	51,20	336,60	220,70
1996	16,70	8,20	73,30	48,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,50	71,70	238,80	171,90
1997	129,80	68,10	257,70	32,50	5,00	19,80	2,30	0,00	0,00	30,30	79,00	126,80
1998	119,30	131,80	35,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,30	224,40	177,10
1999	97,80	85,40	88,00	12,20	0,00	0,00	1,40	0,00	4,80	53,00	244,70	187,70
Estação Serra Branca (Lat: 15°38'12", Long: 42°56'56")												
1988	25,30	51,50	85,40	14,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,30	42,00	238,80
1989	32,90	29,00	156,20	0,00	0,00	16,00	0,00	0,00	14,00	35,70	168,00	445,20
1990	19,80	108,60	0,00	6,50	0,00	0,00	0,00	40,00	6,40	21,30	35,40	46,20
1991	78,60	60,00	86,30	9,40	4,30	0,00	0,00	0,00	5,10	8,50	128,50	183,40
1992	335,20	128,10	9,30	19,00	0,00	0,00	0,00	6,50	0,00	61,40	93,30	298,70
1993	52,20	26,30	0,80	38,20	0,00	0,00	0,00	0,00	2,60	26,30	97,50	158,90
1994	83,60	19,20	144,80	38,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,10	70,00	26,30
1995	21,40	70,30	49,30	6,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,10	108,10	286,20
1996	10,90	46,40	78,60	24,50	0,00	0,00	0,00	0,00	8,20	31,60	176,80	62,00
1997	107,40	86,80	305,90	27,20	9,60	7,60	0,00	0,00	15,20	20,20	105,40	95,70
1998	58,20	80,80	11,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,10	31,80	274,80	190,40
1999	48,70	21,40	56,60	28,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,40	55,10	280,20	172,70

Fonte: ANEEL



Fonte: CODEVASF



Figura 7.2 – Postos pluviométricos 1988-1999

## 7.1. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PLUVIOMETRIA

Como pode ser visto nas figuras 7.1 e 7.2, os postos pluviométricos estão espalhados por toda bacia do rio Gurutuba. Para a obtenção da precipitação média da bacia, foi utilizado o método de espacialização denominado *Krigagem*.

*Krigagem* é um modelo inferencial e sua base conceitual está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, formalizada por Matheron (1971). O termo *Krigagem* vem do nome de Daniel G. Krige, pioneiro a utilizar médias móveis para evitar a superestimativa sistemática de reservas em mineração (INPE, 1998).

O que diferencia a *Krigagem* dos outros métodos de interpolação é a estimativa de uma matriz de covariância espacial. Nessa matriz, são determinados os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (INPE, 1998).

Para a interpolação dos dados das seis estações pluviométricas por meio da *Krigagem*, foi utilizado o software *Solver*, versão 6.04. Os dados de precipitação obtidos para o período de 1970 a 1973 encontram-se na tabela 7.4, seguinte.

Tabela 7.4 – Precipitação média da bacia obtida por meio de *Krigagem* 1970 – 1973 (mm)

Anos	Meses											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1970	252,40	61,00	39,70	21,90	13,90	6,00	5,30	4,20	29,80	179,60	291,40	75,50
1971	17,50	23,20	57,10	40,60	21,40	0,10	0,00	3,50	48,10	92,00	324,90	214,70
1972	90,00	38,60	189,90	126,70	26,20	10,50	0,80	0,00	17,60	129,80	257,00	252,40
1973	101,50	88,80	247,80	15,20	26,20	15,90	0,00	0,00	53,00	111,00	184,30	106,50

A interpolação feita para as três estações com período de 1988 a 1999 resultou nos dados seguintes, constantes da tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Precipitação média da bacia obtida por meio de Krigagem 1988 – 1999 (mm)

Anos	Meses											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1988	40,94	79,73	110,54	33,95	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	85,61	85,39	248,20
1989	79,46	35,61	115,67	11,66	16,45	30,73	4,59	0,00	39,57	51,14	205,46	508,90
1990	7,61	148,26	13,09	9,36	2,12	0,00	3,71	15,20	8,46	32,26	102,29	198,92
1991	193,59	71,19	76,46	19,42	14,44	0,00	0,06	0,00	13,98	25,29	188,21	221,56
1992	480,45	185,64	32,32	28,53	11,57	0,00	0,00	57,16	1,08	85,49	150,07	371,06
1993	47,27	45,88	1,33	37,70	1,40	0,00	0,00	0,00	12,09	19,14	70,20	169,25
1994	213,75	33,02	174,32	34,18	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	9,86	151,15	65,05
1995	117,69	81,08	76,88	56,24	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	73,37	303,52	277,11
1996	12,91	38,97	69,93	50,74	1,52	0,00	0,00	0,00	9,99	91,22	291,69	112,46
1997	149,81	80,79	296,09	40,15	5,95	20,96	0,86	0,00	8,84	39,41	101,55	130,32
1998	141,38	160,07	22,09	0,32	0,95	0,00	0,00	0,00	2,33	51,55	287,52	226,94
1999	117,44	51,17	90,07	13,50	1,52	0,00	1,01	0,06	4,43	55,83	331,34	227,32

## 7.2. MODELO CHUVA-VAZÃO

O modelo de precipitação-vazão utilizado neste trabalho foi o IPH-MEN, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o qual utiliza um intervalo de tempo mensal na simulação (Tucci, 1998).

Outras alternativas de modelo chuva-vazão poderiam ter sido adotadas, mas optou-se pelo IPH-MEN pelo fato de o mesmo apresentar um compromisso aceitável entre precisão requerida para as vazões e dados necessários para a simulação.

O IPH-MEN possui três algoritmos básicos: distribuição de volumes, escoamento superficial e subterrâneo e otimização dos parâmetros. Nesse trabalho, foi feita a otimização dos parâmetros para gerar uma série mais longa de vazões.

O modelo utiliza a seguinte equação de continuidade para estabelecer a distribuição dos volumes de água precipitada no solo:

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - T(t) - E(t) \quad (7.1)$$

onde  $S(t)$  é o armazenamento na camada superior do solo,  $I(t)$  é a infiltração,  $T(t)$  é a percolação e  $E(t)$  é a evaporação.

As equações que relacionam o armazenamento com a infiltração e a percolação são as seguintes:

$$S(t) = a_i + b_i I(t) \quad (7.2)$$

$$S(t) = b_t T(t) \quad (7.3)$$

onde:

$$a_i = \frac{-I_0^2}{\ln h(I_0 - I_b)} \quad (7.4)$$

$$b_i = \frac{I_0}{\ln h(I_0 - I_b)} \quad (7.5)$$

$$b_t = \frac{-I_0}{\ln h I_b} \quad (7.6)$$

$I_b$  – capacidade de infiltração quando o solo está saturado

$I_0$  – capacidade de infiltração do solo quando a umidade é  $S_0$

$h = e^{-k}$

$k$  – parâmetro que caracteriza o decaimento da curva exponencial de infiltração e depende das características do solo

Nesse modelo, os parâmetros dificilmente têm relação específica com os experimentos de Horton, porém permitem que se faça um balanço dos macroprocessos no tempo (Tucci, 1998).

O solo está com sua menor capacidade de infiltração e máxima percolação quando  $I = T$ , expressa da seguinte forma:

$$S_{\max} = \frac{a}{b-c} \quad (7.7)$$

onde:

$$a = I_0 \quad (7.8)$$

$$b = -\frac{\ln h(I_0 - Ib)}{I_0} \quad (7.9)$$

$$c = -\frac{\ln hb}{I_0} \quad (7.10)$$

A equação que relaciona a evapotranspiração e a capacidade de umidade do solo é a seguinte:

$$E = Ep \left[ 1 - \exp\left(-\alpha \frac{S}{S_{\max}}\right) \right] \quad (7.11)$$

A relação E/Ep depende do parâmetro  $\alpha$  e da relação S/S<sub>máx</sub>. Quanto maior for o valor de  $\alpha$ , maior será a evapotranspiração.

A parcela da precipitação que infiltra e a que gera escoamento superficial são:

$$Pi = P \left[ 1 - \frac{(P/I)^2}{P/I + r} \right] \quad (7.12)$$

$$Vs = P \frac{(P/I)^2}{P/I + r} \quad (7.13)$$

O volume gerado no escoamento superficial depende de r e P/I; onde “r” é o parâmetro que relaciona P/I e F(P/I,r).

As equações de propagação do escoamento superficial e subterrâneo são as seguintes:

$$Qs(t+1) = Qs(t) \exp(-\Delta t / Ks) + Vs(t+1)[(1 - \exp(-\Delta t / Ks))] \quad (7.14)$$

$$Qb(t+1) = Qb(t) \exp(-\Delta t / Kb) + Vp(t+1)[(1 - \exp(-\Delta t / Kb))] \quad (7.15)$$

onde Ks é o coeficiente de propagação superficial e representa o tempo de esvaziamento do reservatório superficial. O parâmetro Kb é coeficiente de propagação subterrânea e representa o tempo de esvaziamento do reservatório subterrâneo.

Os parâmetros a serem otimizados no modelo são os seguintes:

a – Parâmetro a

b – Parâmetro b

c – Parâmetro c

r – Parâmetro r

Ks – coeficiente de propagação superficial

Kb – coeficiente de propagação subterrânea

$\alpha$  – coeficiente da equação de infiltração

Os valores de evapotranspiração potencial utilizados na otimização dos parâmetros foram obtidos pelo método de Thornthwaite. Esse método é baseado na temperatura do ar e em dados de precipitação e escoamento de inúmeras bacias hidrográficas localizadas nas regiões central e leste dos Estados Unidos. A correlação da evapotranspiração (ETP) com a temperatura do ar é a seguinte:

$$ETP = Fc16 \left( 10 \frac{T}{I} \right)^a \quad (7.16)$$

onde:

ETP = evapotranspiração potencial para meses de 30 dias com dias com duração de luz de 12 horas;

T = temperatura média do ar

Fc = fator de correção em função da latitude e mês do ano

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{t_i}{5} \right)^{1,514} \quad (7.17)$$

$$a = 67,5 \cdot 10^{-8} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-6} I^2 + 0,01791 I + 0,492 \quad (7.18)$$

onde  $t_i$  são as temperaturas do mês analisado em °C.

A evapotranspiração potencial média obtida pela aplicação do método Thornthwaite foi a seguinte, constante da tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Evapotranspiração potencial (mm/mês)

	Meses											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Média	50,30	141,90	128,30	118,20	101,20	79,40	72,80	89,70	115,30	156,30	128,70	137,60

Aplicando-se o modelo IPH-MEN com os dados de precipitação constantes da tabela 7.4, para os anos de 1970 a 1972, os dados de vazão da tabela 7.1, para o mesmo período, os dados de evapotranspiração potencial média da tabela 7.6, e iniciando os valores estimados dos parâmetros, obtiveram-se os seguintes valores otimizados:

$$a = 212,00; b = 0,50; c = 0,80; K_s = 0,10; K_b = 1,10; r = 2,60; e \alpha = 108,00$$

Para a verificação da otimização, a série de vazões obtida com os parâmetros otimizados para o ano de 1973 foi comparada com a série observada para o mesmo ano, obtendo-se um  $R^2 = 0,78$ , onde:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_c)^2}{\sum (Q_o - Q_m)^2} \text{ (coeficiente de Nash)} \quad (7.19)$$

sendo:

$Q_o$  – vazão observada

$Q_c$  – vazão calculada

$Q_m$  – média da série de vazões observadas

O valor do coeficiente de Nash é considerado um bom valor, visto que ele corresponde à 78% do valor máximo que é 1,00, no caso de um ajuste perfeito entre os valores observados e calculados pelo modelo.

Com os parâmetros otimizados, foi gerada uma série de vazões para o período de 1988 a 1999, por meio da série de precipitações para o mesmo período, constante da tabela 7.5. A série gerada é a seguinte, constante da tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Série de vazões médias mensais gerada pelo IPH-MEN - 1988-1999 (m³/s)

Anos	Meses											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1988	15,597	8,073	7,478	2,279	0,868	0,353	0,145	0,058	0,024	2,203	2,811	14,908
1989	4,403	1,509	5,702	1,136	0,568	0,67	0,488	0,197	0,485	0,97	23,073	120,366
1990	4,805	11,363	1,547	0,671	0,329	0,144	0,088	0,182	0,219	0,373	3,874	21,588
1991	21,148	3,909	2,864	1,035	0,567	0,315	0,128	0,052	0,104	0,27	18,098	4,125
1992	109,577	27,063	9,505	4,013	1,805	0,793	0,32	1,086	0,572	2,418	10,483	64,694
1993	4,706	2,277	0,987	0,762	0,428	0,172	0,069	0,028	0,081	0,195	1,56	14,128
1994	26,395	2,746	15,636	1,491	0,566	0,236	0,095	0,038	0,015	0,048	10,06	2,047
1995	5,974	3,17	2,934	2,025	0,949	0,382	0,154	0,062	0,025	1,492	37,006	26,783
1996	7,475	3,366	2,871	1,847	0,898	0,362	0,146	0,059	0,079	2,689	32,29	6,573
1997	11,059	3,445	34,647	3,197	1,246	0,732	0,446	0,18	0,121	0,452	3,85	7,77
1998	9,966	13,69	2,496	0,993	0,408	0,17	0,069	0,028	0,023	0,657	30,525	6,429
1999	10,591	3,354	4,064	1,294	0,527	0,221	0,097	0,048	0,043	0,806	48,237	6,612

### 7.3. BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico do reservatório foi feito para verificar-se a qualidade da simulação da vazão afluente ao reservatório, feita utilizando-se o modelo IPH-MEN. Foram obtidos dados para o período de 1988 – 1999, os quais permitiram o cálculo da vazão afluente real, isto é, com a obtenção da vazão efluente, da precipitação e da evaporação do reservatório, foi calculada a vazão afluente, de acordo com a equação de balanço hídrico, seguinte:

$$S(t+1) = S(t) + (P - E) * A + V_a - V_e \quad (7.20)$$

onde:

P – Altura precipitada (m)

E – Altura evaporada (m)

A – Área do espelho d'água (m²)

V<sub>a</sub> – Volume afluente ao reservatório (m³)

$V_e$  – Volume efluente ao reservatório ( $m^3$ )

$S(t)$  – Volume armazenado no instante  $t$  ( $m^3$ )

$S(t+1)$  – Volume armazenado no instante  $t+1$  ( $m^3$ )

A vazão afluyente obtida no balanço hídrico foi comparada com a vazão obtida pelo modelo chuva-deflúvio, por meio do coeficiente de Nash, conforme pode ser visto na figura 7.3. O coeficiente de Nash calculado em todo período foi de 0,84, o que é considerado um bom valor, pois corresponde a 84% do valor máximo.

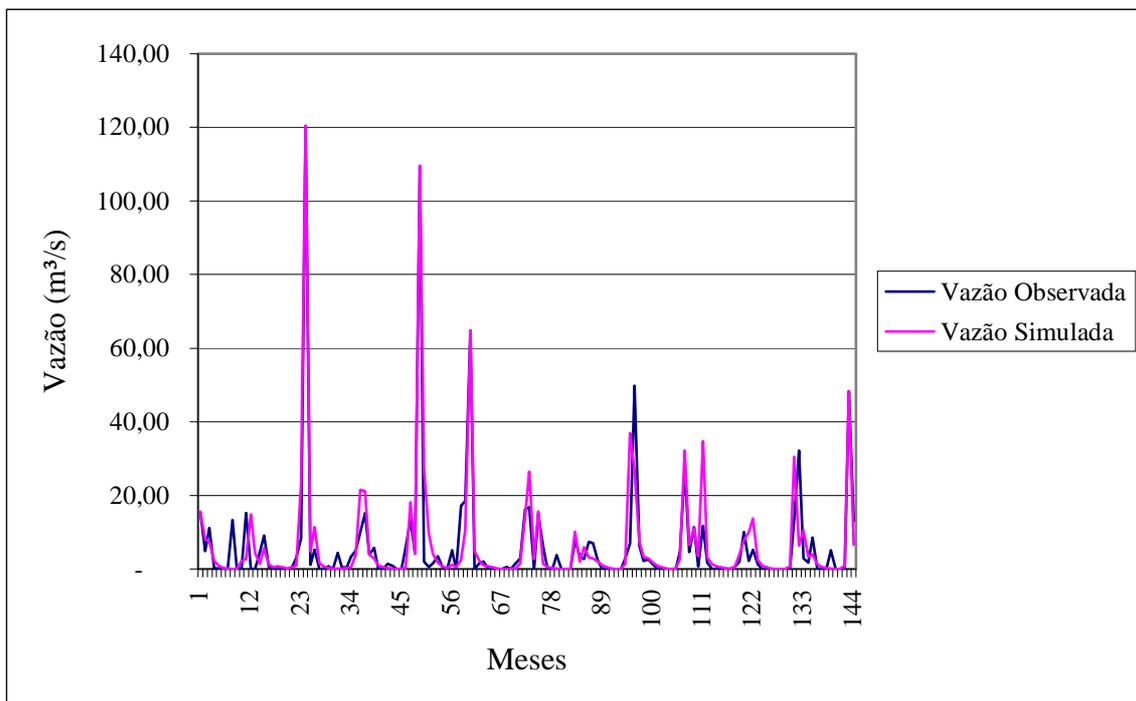


Figura 7.3 – Gráfico comparativo de vazões

#### 7.4. DISPONIBILIDADE MENSAL

A disponibilidade mensal no reservatório no período analisado (abril a setembro) foi calculada para níveis de garantia de disponibilidade, tendo em vista o nível do reservatório em abril.

Para a determinação dos níveis de garantia de disponibilidade foi feita uma simulação da operação do reservatório com os dados disponíveis do balanço hídrico no mesmo período da série sintética gerada a partir do modelo chuva-deflúvio (1988 – 1999). A simulação foi feita apenas com dados mensais de abril a setembro, sem considerar correlação interanual.

Os dados históricos utilizados foram a vazão afluente, citada anteriormente, a evaporação e a precipitação. Para cada simulação, foi feita uma variação da cota do reservatório no início do mês de abril e do volume mensal constante disponível no reservatório. Por meio de um processo iterativo, foi determinado o volume mensal utilizável de tal modo a não ocorrerem falhas de atendimento no mês de setembro (fim do período seco), isto é, ocorrência de uma situação em que restaria em setembro pelo menos 1 m<sup>3</sup> de água no reservatório, em todos os anos da série. Esse volume mensal utilizável era, portanto, correspondente a uma garantia de disponibilidade de 100%. Mantendo o nível inicial do reservatório constante e aumentando o volume mensal constante disponível no reservatório, foi possível a determinação do volume em que ocorria falha em um ano do período da série. Esse volume corresponde à garantia de disponibilidade de 91,67%. Com isso, foi obtido o volume mensal constante disponível no reservatório correspondente a determinadas garantias de disponibilidade. A tabela 7.8 a seguir mostra os resultados obtidos na simulação.

De posse dos dados obtidos na simulação, foi construído um gráfico obtido pela junção dos pontos de mesma garantia de disponibilidade para cada nível (NA) do reservatório, conforme mostra a figura 7.4.

Tabela 7.8 – Simulação das garantias de disponibilidade (1988-1999)

NA (m)	Garantia (%)	Disponibilidade (m <sup>3</sup> )
544	100	2.433.399
544	90	3.461.318
544	75	3.780.376
545	100	7.874.356
545	90	8.944.375
545	75	9.260.332
546	100	13.576.551
546	90	14.689.172
546	75	15.001.957
547	100	19.541.950
547	90	20.697.565
547	75	21.007.113

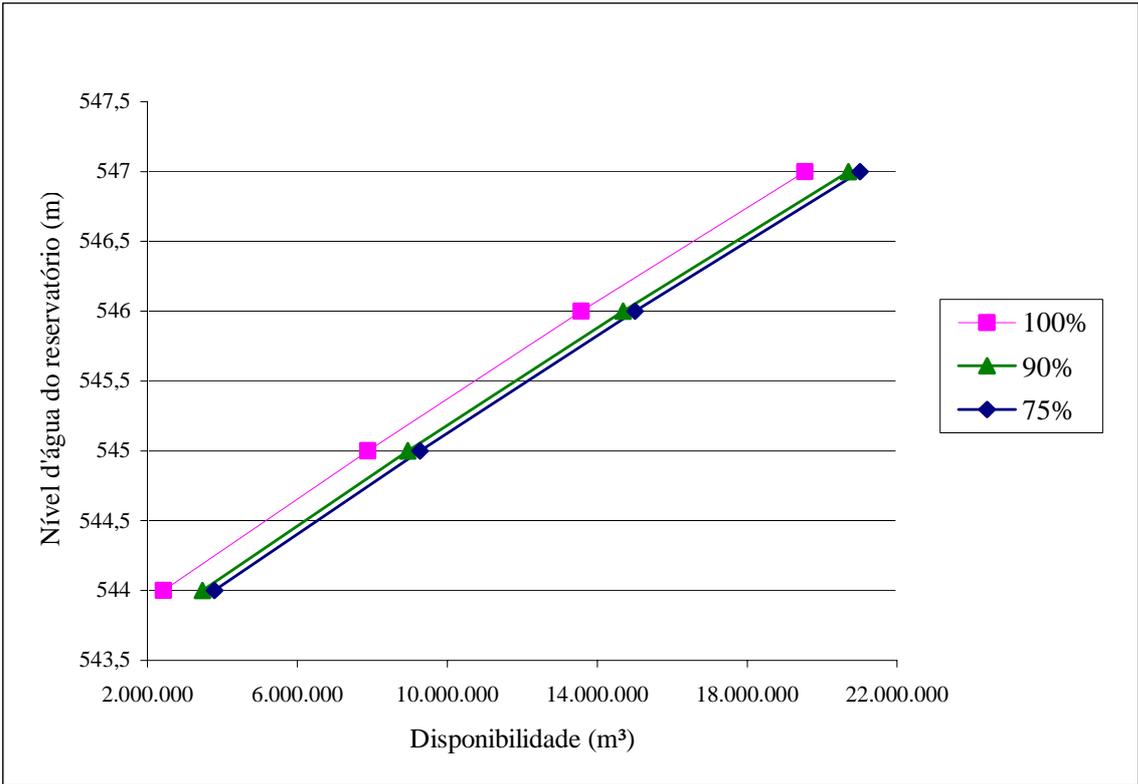


Figura 7.4 – Gráfico Cota Inicial do Reservatório x Disponibilidade

## **8. FORMULAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA**

O primeiro passo na formulação da Programação Dinâmica foi a definição dos usuários da água do reservatório, os quais foram agrupados de acordo com as seguintes características:

- Tipo de Cultura (permanente ou temporária);
- Localização das áreas irrigadas (dentro e fora dos projetos irrigados);
- Lotes empresariais ou de colonos.

Essa classificação deve-se ao fato de que os benefícios variam de acordo com a produção, isto é, empresários tendem a conseguir um valor agregado maior para seus produtos do que os colonos. O benefício também varia com o tipo de cultura que está sendo adotada. A divisão levando-se em consideração a localização das áreas irrigadas tem como objetivo agregar irrigantes com os mesmos interesses.

Os principais grupos de usuários identificados foram os seguintes:

- US1 – Lotes empresariais do Projeto Gorutuba com cultura permanente;
- US2 – Lotes de colonos do Projeto Gorutuba com cultura permanente;
- US3 – Lotes empresariais do Projeto Gorutuba com cultura temporária;
- US4 – Lotes de colonos do Projeto Gorutuba com cultura temporária;
- US5 – Lotes empresariais do Projeto Lagoa Grande com cultura permanente;
- US6 – Lotes empresariais do Projeto Lagoa Grande com cultura temporária;
- US7 – Irrigantes a jusante da barragem com cultura permanente;
- US8 – Irrigantes a jusante da barragem com cultura temporária.

Os dados obtidos foram do ano de 1999, o qual foi adotado como sendo a situação na ocasião da decisão. Os usuários definidos tinham a seguinte configuração, conforme tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Principais culturas por usuário - 1999

Usuário	Tipo de cultura	Área plantada (ha)	Percentual da área total
US1	Banana	853,30	55,28
	Limão	77,00	4,99
	Manga	148,40	9,61
	Pastagem	305,00	19,76
	Outros	160,00	10,36
Total US1		1.543,70	100,00
US2	Banana	1.583,56	86,87
	Limão	50,71	2,78
	Pastagem	65,85	3,61
	Outros	122,89	6,74
Total US2		1.823,01	100,00
US3	Milho	61,50	58,29
	Outros	44,00	41,71
Total US3		105,5	100,00
US4	Feijão	48,45	22,05
	Milho	81,46	37,07
	Outros	89,83	40,88
Total US4		219,74	100,00
US5	Banana	920,80	87,42
	Limão	37,00	3,51
	Outros	95,50	9,07
Total US5		1.053,30	100,00
US6	Milho	28,00	42,42
	Outros	38,00	57,58
Total US6		66,00	100,00
US7	Banana	885,92	62,79
	Limão	33,00	2,34
	Manga	27,00	1,91
	Pastagem	431,00	30,55
	Outros	34,00	2,41
Total US7		1.410,92	100,00
US8	Feijão	195,50	77,20
	Outros	57,75	22,80
Total US8		253,25	100,00

Fonte: CODEVASF (2000) e Ruralminas (2000)

O consumo de água por cultura varia entre empresários e colonos. Os colonos tendem a controlar melhor o consumo da água, visto que isto impacta significativamente na tarifa paga pelo uso das estruturas do sistema público de irrigação. Foram obtidos dados relativos ao ano de 1999 para empresários e colonos dos projetos públicos irrigados. Os colonos tendem a consumir menos água visto que a assistência técnica prestada por empresa contratada pela CODEVASF faz com que haja um maior controle da necessidade de cada cultura, resultando numa otimização do uso da água. Os dados de consumo dos usuários de água localizados fora dos projetos foi estimado como sendo igual ao consumo do grupo empresários, visto que eles não pagam tarifa pelo uso da água. Os dados obtidos encontram-se na tabela 8.2, a seguir.

Tabela 8.2 – Consumo de água por cultura por usuário

Culturas	Cons. Água empresários (1000m <sup>3</sup> /ha x mês)	Cons. Água colonos (1000m <sup>3</sup> /ha x mês)	Cons. Água jusante* (1000m <sup>3</sup> /ha x mês)
Banana	1,25	0,83	1,25
Manga	0,75	0,58	0,75
Limão	0,75	0,58	0,75
Feijão	2,00	1,50	2,00
Milho	2,00	1,50	2,00
Pastagem	0,67	0,67	0,67
Outros	1,00	1,00	1,00

Fonte: CODEVASF

\* Valores estimados

Com isso, estimou-se a demanda mensal de água para cada categoria de usuários, constante da tabela 8.3. Foram estimados, também, os seguintes usos: volume destinado à agricultura familiar, volume retirado diretamente do reservatório (pequenos irrigantes, chácaras e clubes), volume destinado ao abastecimento humano e animal, volume destinado a outros usos a jusante da barragem (clubes, postos de gasolina, etc.), volume captado do rio a jusante da barragem pelos irrigantes dos projetos com o objetivo de não pagamento da tarifa e o volume remanescente, calculado como sendo 70% de  $Q_{7,10}$  de acordo com a Portaria IGAM nº 007/99, no valor de 0,184 m<sup>3</sup>/s. Com isso, foi estimado o volume mensal necessário para o atendimento da demanda total do reservatório.

O critério para classificar a área como de agricultura familiar foi construído como sendo a propriedade que possua uma área total menor que 50 ha e área irrigada menor que 5 ha, considerando que a maior parte das culturas da região estudada possui características

semelhantes. Os colonos localizados nos projetos públicos irrigados não se encontram na categoria de agricultura familiar, visto que as áreas de cada lote são maiores que 50 ha.

Tabela 8.3 – Demanda mensal de água por categoria de usuários

Usuários	Demanda de Água (m <sup>3</sup> )
US1	1.599.008
US2	1.516.004
US3	167.000
US4	284.695
US5	1.274.250
US6	94.000
US7	1.473.733
US8	448.750
	<b>6.857.441</b>
Agricultura Familiar	217.598
	<b>7.075.039</b>
Retirada do Reservatório	428.846
	<b>7.503.886</b>
Abast. humano e animal	407.435
	<b>7.911.321</b>
Outros usos	61.016
	<b>7.972.337</b>
Retirada irregular	299.791
	<b>8.272.128</b>
Vol. Mín. Remanescente	333.850
	<b>8.605.977</b>

Conforme pode ser verificado, a demanda total do reservatório do Bico da Pedra (8,6 milhões de m<sup>3</sup>) pode não ser atendida totalmente tendo em vista que a disponibilidade mensal com garantia de 100% calculada é de 2.433.399 m<sup>3</sup>, para um nível do reservatório de 544m no início do período considerado e de 7.874.356 m<sup>3</sup>, para um nível inicial do reservatório de 545m. Para o nível de 546m, tem-se sobra de água, visto que a disponibilidade mensal é de 13.576.551 m<sup>3</sup>.

Com isso, foi verificada a necessidade da utilização da Programação Dinâmica com o objetivo de otimizar a repartição da água disponível entre os diversos usos, tendo em vista a possibilidade de escassez em algumas situações.

Neste caso, o objetivo com a operação da barragem foi adotado como sendo a maximização dos benefícios líquidos, isto é, o ganho total conseguido com a atividade de agricultura irrigada. As variáveis de decisão são os volumes alocados para cada usuário na simulação. Portanto, a função objetivo proposta é a seguinte:

$$MaxZ = \sum_{i=1}^8 biXi \quad (8.1)$$

Sujeito a:

$$X1 + X2 + \dots + X8 \leq V_d \quad (8.2)$$

$$Xi \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (8.3)$$

Onde:

$X_i$  – volume mensal de água destinado ao usuário “i”;

$b_i$  – benefício econômico gerado pelo fornecimento de água para o usuário “i”;

$V_d = V_T - (Y1 + Y2 + \dots + Y_n)$ , sendo  $n = 1, 2, \dots, 6$ ;

$n$  – número de usos totalmente atendidos

$V_d$  – volume mensal disponível para alocação entre os oito usuários ( $m^3$ );

$V_T$  – volume mensal total disponível ( $m^3$ ) - depende da garantia de disponibilidade e do nível inicial do reservatório no período de abril a setembro.

$Y1$  – demanda mensal para abastecimento humano e animal ( $m^3$ )

$Y2$  – volume remanescente mensal ( $m^3$ )

$Y3$  – demanda mensal de áreas de agricultura familiar ( $m^3$ )

$Y4$  – volume mensal retirado diretamente do reservatório ( $m^3$ )

$Y5$  – volume mensal retirado irregularmente do rio a jusante da barragem ( $m^3$ )

$Y6$  – volume mensal destinado a outros usos ( $m^3$ )

Os volumes destinados aos usos totalmente atendidos na simulação, representados acima pela variável  $Y_n$ , foram determinados anteriormente e constam da tabela 8.3.

A variável de estado desse problema é o volume disponível para alocação entre os usuários. A equação de mudança de estado para esse caso é a seguinte:

$$S_{i+1} = S_i - X_i \quad (8.4)$$

onde:

$$X_i \geq 0 \quad (8.5)$$

$$i = 1, 2, \dots, 8$$

A função-objetivo é uma equação com oito incógnitas, a qual pode ser subdividida em oito equações com apenas uma incógnita, possibilitando, assim, a solução do problema em estágios. Estas equações que relacionam o ótimo de um estágio ao ótimo de outro são chamadas de equações recursivas. Neste caso, os estágios são representados pela alocação de água entre os usuários da barragem.

Considerando a aplicação da PD Regressiva, as equações recursivas são a seguir discriminadas, onde:

$$f_n^*(S_n) = \min_{x_n} f_n(S_n, X_n) = f_n(S_n, X_n^*) \quad (8.6)$$

A unidade das variáveis de decisão é  $10^6 \text{ m}^3$ .

$$f_8^*(S_8) = \text{Max} \{ b_8(X_8) \}$$

$$0 \leq X_8 \leq 0,45$$

$$0 \leq S_8 \leq V_d$$

$$f_7^*(S_7) = \text{Max} \{ b_7(X_7) + f_8(S_7 - X_7) \}$$

$$0 \leq X_7 \leq 1,50$$

$$0 \leq S_7 \leq V_d$$

$$f_6^*(S_6) = \text{Max} \{ b_6(X_6) + f_7(S_6 - X_6) \}$$

$$0 \leq X_6 \leq 0,10$$

$$0 \leq S_6 \leq V_d$$

$$f_5^*(S_5) = \text{Max} \{ b_5(X_5) + f_6(S_5 - X_5) \}$$

$$0 \leq X_5 \leq 1,30$$

$$0 \leq S5 \leq V_d$$

$$f4^*(S4) = \text{Max} \{ b4(X4) + f5(S4-X4) \}$$

$$0 \leq X4 \leq 0,30$$

$$0 \leq S4 \leq V_d$$

$$f3^*(S3) = \text{Max} \{ b3(X3) + f4(S3-X3) \}$$

$$0 \leq X3 \leq 0,20$$

$$0 \leq S3 \leq V_d$$

$$f2^*(S2) = \text{Max} \{ b2(X2) + f3(S2-X2) \}$$

$$0 \leq X2 \leq 1,55$$

$$0 \leq S2 \leq V_d$$

$$f1^*(S1) = \text{Max} \{ b1(X1) + f2(S1-X1) \}$$

$$0 \leq X1 \leq 1,60$$

$$S1 = V_d$$

Foram levantados os benefícios líquidos obtidos com a venda da produção para cada cultura e por área irrigada, listados na tabela 8.4. Os benefícios obtidos pelos empresários e pelos colonos são diferentes, visto que os empresários produzem em maior quantidade e assim conseguem um valor maior pelo seu produto. Quando os colonos estão associados, os mesmos podem conseguir também um melhor preço pelo produto. Considerou-se neste trabalho que os colonos não estão associados, o que foi verificado na região em estudo. O benefício de culturas menos significativas foi estimado como sendo a média dos benefícios da mesma cultura obtidos para os outros usuários.

De posse dos dados de benefício líquido por hectare e de consumo mensal de água por hectare para cada cultura, foi possível estimar o benefício gerado por cada categoria de usuários para valores pré-definidos de volume utilizável, conforme demonstrado a seguir, o que gerou a tabela 8.5, base para a aplicação da Programação Dinâmica.

$$biXi = (P_1 * (Xi / B_1 * C_1)) + (P_2 * (Xi / B_2 * C_2)) + \dots + (P_n * (Xi / B_n * C_n)) \quad (8.7)$$

Onde:

$i = 1, 2, \dots, 8$

$b_i X_i$  – Benefício total do usuário  $i$

$X_i$  – Volume fornecido ao usuário  $i$

$P_n$  – Percentual da cultura  $n$

$B_n$  – Benefício líquido da cultura  $n$

$C_n$  – Consumo de água da cultura  $n$

$n$  – tipo de cultura plantada

Procurou-se com a aplicação da Programação Dinâmica avaliar uma metodologia, mais do que fazer uma simulação precisa e fidedigna da realidade. Existem, na realidade, algumas incertezas como, por exemplo, na definição da demanda de água de cada usuário, tendo em vista que o levantamento dos usuários localizados fora dos projetos públicos irrigados foi feito nos anos de 1996 e 1997, cuja configuração pode ter mudado significativamente até 1999, haja vista que não há controle da fiscalização por parte do IGAM e as outorgas estão quase todas vencidas. Outra incerteza identificada foi na determinação do consumo de água por cultura, o que no caso de uma simulação deve ser mais precisa.

Outra incerteza ocorre na definição do benefício líquido gerado por cultura e por área irrigada, o qual foi determinado por meio de informações obtidas nos distritos de irrigação, os quais fazem um controle do valor obtido com a venda da produção no perímetro irrigado.

Tabela 8.4 – Benefícios gerados por cultura e por usuários

Usuário	Tipo de cultura	Benefício (R\$/ha)	Percentual da área total
US1	Banana	2.000,00	55,28
	Limão	675,00	4,99
	Manga	1.600,00	9,61
	Pastagem	240,00	19,76
	Outros	1.128,75	10,36
US2	Banana	1.264,00	86,87
	Limão	180,00	2,78
	Pastagem	240,00	3,61
	Outros	561,00	6,74
US3	Milho	530,00	58,29
	Outros	530,00	41,71
US4	Feijão	400,00	22,05
	Milho	200,00	37,07
	Outros	300,00	40,88
US5	Banana	2.000,00	87,42
	Limão	675,00	3,51
	Outros	1.128,75	9,07
US6	Milho	530,00	42,42
	Outros	530,00	57,58
US7	Banana	1.264,00	62,79
	Limão	1.600,00	2,34
	Manga	675,00	1,91
	Pastagem	240,00	30,55
	Outros	945,00	2,41
US8	Feijão	400,00	77,20
	Outros	400,00	22,80

Fonte: CODEVASF (2003)

Tabela 8.5 – Benefícios líquidos obtidos por volume fornecido e por usuário (R\$)

<b>X<sub>i</sub> (1000000 m<sup>3</sup>)</b>	<b>b1X1</b>	<b>b2X2</b>	<b>b3X3</b>	<b>b4X4</b>	<b>b5X5</b>	<b>b6X6</b>	<b>b7X7</b>	<b>b8X8</b>
<b>0</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>0,05</b>	66.160,42	69.139,88	18.815,00	11.439,60	76.479,38	20.935,00	57.348,27	14.832,29
<b>0,1</b>	132.320,83	138.279,77	37.630,00	22.879,21	152.958,75	41.870,00	114.696,54	29.664,58
<b>0,15</b>	198.481,25	207.419,65	56.445,00	34.318,81	229.438,13	41.870,00	172.044,81	44.496,88
<b>0,2</b>	264.641,67	276.559,53	75.260,00	45.758,42	305.917,50	41.870,00	229.393,08	59.329,17
<b>0,25</b>	330.802,08	345.699,41	75.260,00	57.198,02	382.396,88	41.870,00	286.741,35	74.161,46
<b>0,3</b>	396.962,50	414.839,30	75.260,00	68.637,62	458.876,25	41.870,00	344.089,62	88.993,75
<b>0,35</b>	463.122,92	483.979,18	75.260,00	68.637,62	535.355,63	41.870,00	401.437,89	103.826,04
<b>0,4</b>	529.283,33	553.119,06	75.260,00	68.637,62	611.835,00	41.870,00	458.786,16	118.658,33
<b>0,45</b>	595.443,75	622.258,94	75.260,00	68.637,62	688.314,38	41.870,00	516.134,43	133.490,63
<b>0,5</b>	661.604,17	691.398,83	75.260,00	68.637,62	764.793,75	41.870,00	573.482,70	133.490,63
<b>0,55</b>	727.764,58	760.538,71	75.260,00	68.637,62	841.273,13	41.870,00	630.830,97	133.490,63
<b>0,6</b>	793.925,00	829.678,59	75.260,00	68.637,62	917.752,50	41.870,00	688.179,24	133.490,63
<b>0,65</b>	860.085,42	898.818,47	75.260,00	68.637,62	994.231,88	41.870,00	745.527,51	133.490,63
<b>0,7</b>	926.245,83	967.958,36	75.260,00	68.637,62	1.070.711,25	41.870,00	802.875,78	133.490,63
<b>0,75</b>	992.406,25	1.037.098,24	75.260,00	68.637,62	1.147.190,63	41.870,00	860.224,05	133.490,63
<b>0,8</b>	1.058.566,67	1.106.238,12	75.260,00	68.637,62	1.223.670,00	41.870,00	917.572,32	133.490,63
<b>0,85</b>	1.124.727,08	1.175.378,01	75.260,00	68.637,62	1.300.149,38	41.870,00	974.920,59	133.490,63
<b>0,9</b>	1.190.887,50	1.244.517,89	75.260,00	68.637,62	1.376.628,75	41.870,00	1.032.268,86	133.490,63
<b>0,95</b>	1.257.047,92	1.313.657,77	75.260,00	68.637,62	1.453.108,13	41.870,00	1.089.617,13	133.490,63
<b>1</b>	1.323.208,33	1.382.797,65	75.260,00	68.637,62	1.529.587,50	41.870,00	1.146.965,40	133.490,63
<b>1,05</b>	1.389.368,75	1.451.937,54	75.260,00	68.637,62	1.606.066,88	41.870,00	1.204.313,67	133.490,63
<b>1,1</b>	1.455.529,17	1.521.077,42	75.260,00	68.637,62	1.682.546,25	41.870,00	1.261.661,94	133.490,63
<b>1,15</b>	1.521.689,58	1.590.217,30	75.260,00	68.637,62	1.759.025,63	41.870,00	1.319.010,21	133.490,63
<b>1,2</b>	1.587.850,00	1.659.357,18	75.260,00	68.637,62	1.835.505,00	41.870,00	1.376.358,48	133.490,63
<b>1,25</b>	1.654.010,42	1.728.497,07	75.260,00	68.637,62	1.911.984,38	41.870,00	1.433.706,75	133.490,63
<b>1,3</b>	1.720.170,83	1.797.636,95	75.260,00	68.637,62	1.988.463,75	41.870,00	1.491.055,02	133.490,63
<b>1,35</b>	1.786.331,25	1.866.776,83	75.260,00	68.637,62	1.988.463,75	41.870,00	1.548.403,29	133.490,63
<b>1,4</b>	1.852.491,67	1.935.916,71	75.260,00	68.637,62	1.988.463,75	41.870,00	1.605.751,56	133.490,63
<b>1,45</b>	1.918.652,08	2.005.056,60	75.260,00	68.637,62	1.988.463,75	41.870,00	1.663.099,83	133.490,63
<b>1,5</b>	1.984.812,50	2.074.196,48	75.260,00	68.637,62	1.988.463,75	41.870,00	1.720.448,10	133.490,63
<b>1,55</b>	2.050.972,92	2.143.336,36	75.260,00	68.637,62	1.988.463,75	41.870,00	1.720.448,10	133.490,63
<b>1,6</b>	2.117.133,33	2.143.336,36	75.260,00	68.637,62	1.988.463,75	41.870,00	1.720.448,10	133.490,63

## **9. ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA MULTIOBJETIVO**

A análise de alternativas discretas levando-se em consideração múltiplos critérios foi feita a partir das fases de coleta de informações, formulação do problema, escolha das alternativas e análise dos resultados.

A coleta de informações desenvolveu-se durante todo processo, fundamentando a escolha dos critérios e das alternativas. Os critérios podem ser quantitativos, expressos em escala numérica, ou qualitativos, expressos em escala subjetiva, e pode-se querer maximizá-los ou minimizá-los. É assumido que a escolha do decisor será feita com um número finito de alternativas, as quais formam o conjunto de escolha.

Na etapa de formulação do problema, são escolhidos os atributos para cada critério. Os atributos são linhas de avaliação, como por exemplo, preço, qualidade, aparência e força, os quais auxiliam no processo de decisão. Quando uma quantidade mínima de informação sobre as preferências de um decisor é adicionada a esses atributos, estes se tornam critérios. Com isso, é possível estabelecer uma matriz de avaliação, em que as alternativas de projetos estão nas linhas e cada uma delas é avaliada por cada um dos critérios que estão nas colunas.

Com base nessas etapas, fica possível o ordenamento das alternativas. Na etapa de análise dos resultados, é feita uma análise de sensibilidade a qual avalia o impacto da mudança de certas premissas na solução final.

### **9.1. IDENTIFICAÇÃO DOS INTERESSES DOS ATORES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DECISÓRIO**

Com o objetivo de identificar e caracterizar os principais interessados na melhoria da gestão do uso da água do reservatório do Bico da Pedra, foram realizadas algumas entrevistas de caráter geral e aleatório na área afetada pela operação da barragem. As entrevistas foram úteis também no levantamento dos principais anseios dos diversos atores quanto ao uso ótimo da água.

Os usuários identificados foram divididos em cinco grupos, cada qual representando uma categoria expressiva no contexto da gestão da água.

#### *Grupo I – Distritos de irrigação*

Existem dois Distritos de Irrigação nas áreas irrigadas atendidas pelo reservatório. O primeiro a ser formado foi o Distrito de Irrigação do Gorutuba – DIG, o qual representa os 424 irrigantes do Projeto Gorutuba, dentre eles empresários e colonos. O outro distrito é na verdade uma associação denominada ASSIEG – Associação dos Irrigantes da Margem Esquerda, a qual é a responsável pela operação do Projeto Lagoa Grande, com 53 irrigantes associados.

Verificou-se que existem falhas tanto na manutenção quanto na operação dos sistemas de irrigação, identificados pelos representantes dos dois distritos. Existe muito desperdício de água nos dois projetos causado pela falta de assistência técnica e automatização dos projetos e, no caso do Projeto Lagoa Grande, por infiltração do canal principal devido à falta de manutenção.

As principais preocupações expressas por esse grupo são de caráter operacional, como por exemplo, a falta de envolvimento da CODEVASF na operação do sistema, a pouca quantidade de investimentos na recuperação das estruturas de adução e comportas, o desperdício causado pela má aplicação das técnicas de irrigação. Outro problema levantado foi a necessidade freqüente de racionamento nos períodos em que o reservatório está mais vazio, com o objetivo de evitar a falta de água para os projetos.

Portanto, o objetivo principal relacionado com a operação da barragem identificado por esse grupo é a *garantia de abastecimento de água para os Distritos*.

#### *Grupo II – Decisor político municipal*

O município de Janaúba é abastecido com água proveniente da barragem do Bico da Pedra. Foi realizada uma entrevista com o representante da Prefeitura Municipal de Janaúba com o objetivo de colher os anseios da população com relação à operação da barragem.

A principal atividade do município é o comércio informal, além da fruticultura irrigada e da bovinocultura. Foi formada uma Divisão de Desenvolvimento Econômico com o objetivo de cadastrar os empresários informais, além de prover treinamento e agilizar a disponibilização de financiamentos bancários. A prefeitura possui um projeto de implantação de um distrito industrial, em que os lotes serão vendidos ou doados às empresas. Atualmente, a atividade industrial é muito reduzida, sendo considerada desprezível neste trabalho.

Para aumentar a arrecadação municipal seria necessária a fiscalização dos empresários inadimplentes e a regularização das indústrias informais, além da atração de indústrias de beneficiamento dos produtos agrícolas. A prefeitura é reticente quanto ao aumento de áreas irrigadas porque os agricultores são isentos de tributação e não há água suficiente para isso.

Foram identificados os principais objetivos do decisor político municipal com a otimização da operação do reservatório, descritos a seguir:

- *Possibilidade de lazer;*
- *Atendimento ao pequeno agricultor.*

### *Grupo III – Irrigantes localizados a jusante da barragem*

A maioria dos agricultores localizados a jusante da barragem não possui outorga para o uso da água. A concessão de outorgas foi suspensa pelo IGAM porque a capacidade do reservatório está no limite. Quase todas as outorgas antigas venceram e os agricultores encontram-se irregulares.

A água liberada pela CODEVASF destina-se ao abastecimento do Projeto Lagoa Grande e o restante fica como vazão remanescente no rio, a qual deve ser de 70% da  $Q_{7,10}$  segundo a Portaria Administrativa nº 010/98 do IGAM, publicada em 23 de janeiro de 1999. Porém, essa vazão não é suficiente para atender todos os irrigantes localizados a jusante da barragem. Com isso, na época da seca, os irrigantes fazem reclamações à CODEVASF, para que esta libere mais água para o rio. Justamente, nessa época, o perímetro irrigado encontra-se em racionamento, não havendo como liberar mais água.

Portanto, o principal objetivo identificado pelos irrigantes a jusante da barragem, por meio de entrevistas, foi a *garantia de abastecimento de água das áreas fora dos perímetros irrigados*.

#### *Grupo IV – Órgãos ambientais*

Existem diversos órgãos ambientais envolvidos na questão ambiental da região da barragem do Bico da Pedra. Os principais agentes identificados foram: o CODEMA de Nova Porteirinha e Janaúba, o INPAMA – Instituto Nacional de Proteção ao Meio Ambiente, o IEF – Instituto Estadual de Florestas e a Polícia Florestal.

Os principais problemas ambientais identificados em entrevistas com os representantes desses órgãos foram os seguintes:

- Retirada de areia das margens e do leito do rio;
- A má qualidade da água do rio devido ao não-tratamento dos esgotos municipais e à pouca vazão;
- A presença de Taboas (plantas aquáticas) que impedem o escoamento da água;
- Contaminação por agrotóxicos;
- Problemas de abastecimento de comunidades a jusante de Janaúba;
- Poluição por lavadeiras;
- Ocupação desordenada das margens do reservatório, não respeitando a faixa de preservação obrigada por lei;
- Desmatamento das matas ciliares.

Alguns desses problemas ambientais exigem uma ação dos órgãos ambientais e públicos em fiscalizar e punir algumas práticas ilegais que geram degradação do meio ambiente. A operação da barragem influencia na capacidade de autodepuração do rio, a qual fica reduzida quando a vazão é pequena. O abastecimento de localidades a jusante é outro problema no qual a operação da barragem influencia. O volume do reservatório também influencia na autodepuração de esgotos e agrotóxicos.

Portanto, com relação à operação da barragem do Bico da Pedra, os órgãos ambientais identificaram os seguintes objetivos:

- *Diminuição dos impactos ambientais causados pela irrigação;*
- *Minimização do deplecionamento;*
- *Garantia de uma vazão remanescente.*

#### *Grupo V – CODEVASF*

A CODEVASF é a empresa pública responsável pela operação da barragem, sendo que a vazão destinada ao Projeto Gorutuba é liberada separadamente e a estrutura é operada pelo DIG (Distrito de Irrigação do Gorutuba). O mesmo ocorre com a vazão destinada ao abastecimento da cidade de Janaúba, a qual é liberada pela COPASA. A CODEVASF opera somente a vazão liberada ao rio, para o abastecimento do Projeto Lagoa Grande e para a vazão remanescente.

Foram realizadas entrevistas com alguns funcionários da CODEVASF, tanto os lotados em Montes Claros (1ª Superintendência Regional), quanto os lotados na sede em Brasília. A opinião unânime é que a barragem foi construída com o objetivo de atender aos projetos da CODEVASF e ao abastecimento humano. Porém, todos eles têm consciência dos problemas existentes na operação e manutenção dos perímetros, problemas esses que influenciam na vazão requerida pelos agricultores.

Na opinião dos funcionários da CODEVASF, deveria ser feito um Plano Anual de operação da barragem, no qual seria definido o volume disponível no início do período seco e a demanda de água para cada cultura e por tipo de método de irrigação, definindo, assim, um volume de água disponível para cada irrigante.

A principal preocupação da CODEVASF é o atendimento aos perímetros irrigados, isto é, a minimização do déficit para os projetos, com conseqüente aumento da produção agrícola e da produtividade. Portanto, o principal objetivo identificado pelos funcionários da CODEVASF é a *garantia de abastecimento de água para os projetos públicos irrigados.*

#### *Resumo dos objetivos identificados*

- **Objetivos Sociais**

- Possibilidade de lazer;
  - Atendimento ao pequeno agricultor.
- **Objetivos Ambientais**
    - Minimização dos impactos ambientais causados pela irrigação;
    - Minimização do deplecionamento;
    - Garantia de uma vazão remanescente.
- **Objetivos Econômicos**
    - Garantia do abastecimento de água para os Distritos;
    - Garantia de abastecimento de água para usuários de jusante;
    - Maximização dos benefícios totais com a irrigação.

## **9.2. ESTRUTURAÇÃO DOS CRITÉRIOS**

Os critérios de avaliação foram definidos, em processo iterativo de discussão com alguns dos entrevistados, levando-se em consideração todas as possíveis conseqüências da operação do reservatório, tendo, como base, os objetivos propostos pelos atores envolvidos no processo decisório. A medida de cada critério pode ser definida por uma escala numérica ou subjetiva, e foi estabelecida para cada um dos critérios, conforme tabela 9.1.

### **a) Intensidade de atividades de lazer**

Este critério representa a influência da operação do reservatório nas atividades de lazer. Essas atividades podem ocorrer no reservatório, como, por exemplo, passeio de barco, pesca esportiva, banho, etc., e também a jusante da barragem, como banho e pesca.

A diminuição do nível do reservatório diminui a sua capacidade de autodepuração e com isso a água poderá se tornar imprópria para banho e pode ocorrer mortandade de peixes. Outra conseqüência do rebaixamento do nível do reservatório é a diminuição da atividade náutica no reservatório.

Tabela 9.1 - Critérios de avaliação propostos

Critérios de Avaliação		Medida	Especificação
Critérios Sociais:	1. Intensidade de atividades de lazer	Subjetiva	Classificação em níveis (1 a 7) (depende de fatores como nível do reservatório e vazão liberada a jusante)
	2. Percentual de atendimento da agricultura familiar (áreas a jusante do reservatório)	%	Volume fornecido para propriedades consideradas de agricultura familiar (ver critério de agricultura familiar)
Critérios ambientais:	3. Minimização do deplecionamento	m	Nível do reservatório no final do período considerado.
	4. Garantia de uma vazão remanescente	%	Percentual de atendimento de uma vazão $\geq 70\% Q_{7,10}$ durante todo o período crítico.
Critérios Econômicos:	5. Garantia do abastecimento de água para o Distrito	Subjetiva	Classificação em níveis (1 a 10). Combinação de dois fatores: garantia de disponibilidade em todo o período crítico e percentual de atendimento.
	6. Garantia de abastecimento de água para usuários a jusante (agricultura patronal)	Subjetiva	Classificação em níveis (1 a 10). Combinação de dois fatores: garantia de disponibilidade em todo período crítico e percentual de atendimento.
	7. Maximização do benefício com a irrigação	10 <sup>6</sup> R\$	Benefício gerado (depende da área, do tipo de cultura e do preço do produto – dentro e fora dos perímetros irrigados).

Quanto às atividades de lazer a jusante do reservatório, a mais comum é o banho. Devido ao lançamento de esgoto in natura proveniente dos núcleos urbanos situados nas margens do rio Gorutuba, a água pode se tornar imprópria para banho com a diminuição da vazão liberada a jusante da barragem.

Os fatores que determinaram a escala subjetiva adotada são decorrentes da operação do reservatório. A atividade de lazer pode se dar tanto no reservatório como ao longo do rio a jusante do barramento. Portanto, foi criada uma escala com o objetivo de se agregarem os diferentes fatores e assim poder classificar a alternativa de acordo com este critério.

Os fatores analisados foram os seguintes:

1. nível de água do reservatório no final do período
2. volume liberado a jusante da barragem que seria igual à soma dos volumes destinado aos seguintes usuários US5, US6, US7, US8, agricultura familiar, retirada irregular e volume mínimo remanescente, o qual influencia na capacidade de autodepuração do rio.

Escala de valores destinada ao critério intensidade de atividades de lazer

Nível do reservatório:

$N1 < 543,80 \text{ m}$

$543,80 \text{ m} < N2 < 544,00 \text{ m}$

$N3 > 544,00 \text{ m}$

Percentual do volume total liberado a jusante:

$V1 < 40\%$

$40\% < V2 < 80\%$

$V3 > 80\%$

A escala proposta agrega as duas avaliações acima, resultando em uma escala de 1 a 7, com sentido de preferência crescente.

- 1 – corresponde a N1V1
- 2 – corresponde a N1V2
- 3 – corresponde a N2V1
- 4 – corresponde a N2V2
- 5 – corresponde a N2V3
- 6 – corresponde a N3V2
- 7 – corresponde a N3V3

#### **b) Número de propriedades com agricultura familiar**

A propriedade que possua uma área total menor que 50 ha e área irrigada menor que 5 ha, considerando que a maior parte das culturas da região estudada possui características semelhantes, pode ser considerada agricultura familiar.

As áreas de agricultura familiar se localizam fora dos perímetros irrigados e geralmente são constituídas de culturas temporárias, mas existem exceções. Portanto, esse critério será quantificado de acordo com o percentual de atendimento das propriedades que se encontrem nessa classificação (agricultura familiar).

#### **c) Minimização do deplecionamento**

Este critério é quantificado pelo nível do reservatório no final do período crítico, neste caso de abril a setembro. Esse nível é obtido pela simulação do reservatório para cada uma das alternativas.

#### **d) Garantia de uma vazão remanescente**

A Portaria IGAM nº 007/99 estabelece uma vazão remanescente de no mínimo 70% da  $Q_{7,10}$ . Para cada uma das alternativas, calcula-se o percentual de atendimento deste parâmetro ao longo do período.

### e) Garantia de abastecimento de água para o Distrito

A garantia de fornecimento de água varia de acordo com dois fatores: a garantia de disponibilidade em todo período crítico e o percentual de atendimento estabelecido em cada uma das alternativas.

Esses dois fatores podem ser agregados em um único, obtendo-se uma escala para a avaliação deste critério, conforme gráfico da figura 9.1, a seguir.

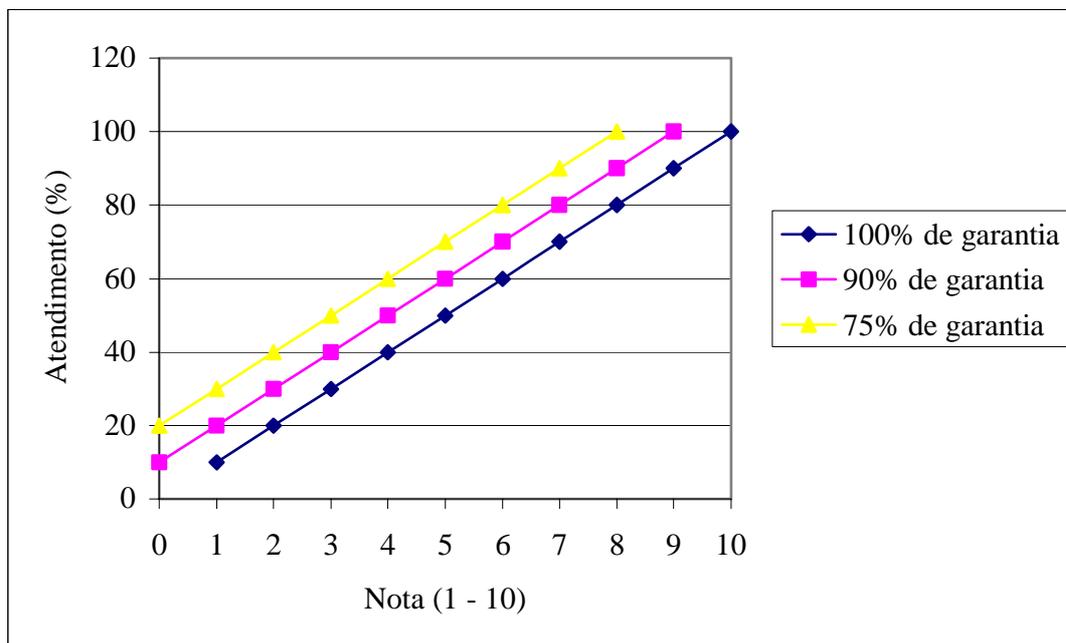


Figura 9.1 – Escala de avaliação do critério garantia de disponibilidade

### f) Garantia de abastecimento de água para usuários a jusante

A escala de valores estabelecida para o critério anterior pode ser utilizada para esse critério.

### h) Maximização do benefício com a irrigação

O benefício proveniente da atividade de irrigação é quantificado de acordo com o benefício que cada cultura gera por m<sup>3</sup> de água fornecido. O benefício depende também do tipo de irrigante (colono ou empresário).

A área irrigada é definida para cada usuário com base em dados do ano de 1999. No caso de um planejamento no âmbito do comitê de bacia, deve ser feita uma estimativa da área irrigada por cultura para cada um dos usuários. Os dados dos irrigantes a jusante da barragem foram obtidos do MMA (1998).

O cálculo do benefício por usuário é feito levando-se em consideração os seguintes parâmetros:

- Consumo de água por cultura (m<sup>3</sup>/ha) –  $C_n$
- Benefício líquido por cultura (R\$/ha) -  $R_n$
- Percentual da área irrigada de cada cultura –  $p_n$
- Volume de água mensal requerida por cultura (m<sup>3</sup>) –  $X_n$

O benefício líquido por usuário é obtido da seguinte forma:

$$B_j = p_1 \cdot \left[ \left( \frac{X_1}{C_1} \right) \cdot R_1 \right] + p_2 \cdot \left[ \left( \frac{X_2}{C_2} \right) \cdot R_2 \right] + \dots + p_n \cdot \left[ \left( \frac{X_n}{C_n} \right) \cdot R_n \right] \quad (9.1)$$

Onde  $n$  é o número de culturas do usuário  $j$ .

### 9.3. DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Os usuários de água do reservatório foram definidos no capítulo 8 e foram agrupados em oito categorias.

As alternativas foram definidas levando-se em consideração três estratégias de operação: garantia de disponibilidade em todo período considerado, atendimento aos diferentes usos e nível do reservatório no início do período considerado.

A variação da garantia de disponibilidade aumenta ou diminui a água disponível no reservatório, isto é, o volume mensal que pode ser liberado para os diversos usos. O cálculo dos volumes disponíveis em função das garantias de disponibilidade foi feito no capítulo 7, variando-se o nível do reservatório.

O atendimento aos diversos usos pode ser feito de várias formas. Optou-se por identificar diferentes formas de agrupamento dos usuários, de forma a cobrir as configurações mais prováveis de ocorrer.

#### Estratégias de operação

Estratégia A: Garantias de disponibilidade

Possibilidades: A1: 100% de garantia

A2: 90% de garantia

A3: 75% de garantia

Estratégia B: Atendimento aos diferentes usos

Possibilidades: B1: atendimento à 100% dos usos

B2: atendimento de 100% de US1, US2, US3, US4, US5 e US6, e atendimento de 90% de US7 e US8.

B3: atendimento de 100% de US1, US2, US3, US4, US5, US6 e US7 e 70% de US8.

B4: atendimento de 100% de US1, US2 e US5, 90% de US3, US4, US6 e US7 e 70% de US8.

Estratégia C: Volume disponível

Possibilidades: C1: Nível inicial do reservatório igual a 544m

C2: Nível inicial do reservatório igual a 545m

As alternativas propostas estão descritas na tabela 9.2, a seguir.

Tabela 9.2 - Alternativas de solução

Alternativa	Ações	Alternativa	Ações	Alternativa	Ações
I	A1B1C1	IX	A2B1C1	XVII	A3B1C1
II	A1B1C2	X	A2B1C2	XVIII	A3B1C2
III	A1B2C1	XI	A2B2C1	XIX	A3B2C1
IV	A1B2C2	XII	A2B2C2	XX	A3B2C2
V	A1B3C1	XIII	A2B3C1	XXI	A3B3C1
VI	A1B3C2	XIV	A2B3C2	XXII	A3B3C2
VII	A1B4C1	XV	A2B4C1	XXIII	A3B4C1
VIII	A1B4C2	XVI	A2B4C2	XXIV	A3B4C2

Na estratégia B, as diferentes possibilidades foram elaboradas com diferentes critérios de agrupamento dos diferentes usuários da água do reservatório.

A possibilidade B1 atende a todos os usos em 100%, porém contribui para um maior deplecionamento do reservatório, comprometendo as atividades de recreação e lazer.

A possibilidade B2 atende a totalidade da demanda dos projetos públicos irrigados e os usuários fora dos perímetros são atendidos em apenas 90% da demanda.

A possibilidade B3 atende a totalidade da demanda dos projetos públicos irrigados e também das culturas permanentes fora dos projetos e somente 70% da demanda para as culturas temporárias fora dos projetos.

A possibilidade B4 atende toda a demanda dos projetos públicos com cultura permanente, 90% da demanda dos perímetros irrigados com cultura temporária e das culturas permanentes fora dos projetos e 70% das culturas temporárias fora dos projetos.

#### **9.4. IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE OS CRITÉRIOS**

Na análise multicritério, o decisor tem consciência de que um critério é mais ou menos importante do que outro. Essa medida de importância é chamada de *peso*.

A importância que cada um dos decisores atribui aos critérios estão suscetíveis a preferências, fraquezas, desvios de percepção, dentre outros. Para prevenir esses desvios, deve-se tentar tornar o processo de decisão mais ordenado, objetivo e transparente (Braga e Gobetti, 1997).

Após a coleta dos pesos atribuídos pelos decisores aos diferentes critérios para um dado problema, é muito importante a avaliação desses pesos, de modo que essa escolha reflita as preferências dos decisores o mais precisamente possível.

Um conceito importante é o da natureza do peso, que pode ser cardinal ou ordinal. Os pesos *ordinais* são aqueles em que somente a sua classificação é levada em consideração. No caso dos pesos ditos *cardinais*, o que importa é o seu valor numérico exato.

Em métodos como o ELECTRE, os pesos devem ser cardinais, numa escala de intervalos, porque estes serão utilizados para avaliar a importância de cada critério (Pomerol e Romero, 2000).

Existem vários métodos de avaliação dos pesos, onde sua aplicação afeta a escolha final entre as alternativas. Um método muito simples é o *método de entropia*, em que os pesos são determinados sem o envolvimento direto do decisor. Nesse método, a importância relativa de um critério, medida pelo peso, é uma função direta da importância de um critério relativa ao conjunto total de alternativas. Pode ser requisitado aos decisores que multipliquem os valores dos pesos obtidos pelo *método de entropia* por um fator que representam as suas preferências.

A classe de métodos diretos de avaliação é aquela em que o decisor indica diretamente o valor dos pesos para cada critério. Eles são os métodos mais antigos e têm sido muito estudados em diferentes contextos. Dentre esses métodos, está o do *ordenamento simples*, o qual consiste no ordenamento puro e simples dos critérios. A única informação requerida do decisor é que ele ordene os critérios por ordem de preferência. A maior vantagem deste método é a sua simplicidade. Uma séria desvantagem é que ele admite que os pesos possam ter todos os valores possíveis entre 0 e 1, após sua normalização.

Outro método para avaliação dos pesos é a *avaliação cardinal simples*, onde o decisor avalia cada critério de acordo com uma escala pré-definida. Este tipo de método requer que o decisor forneça mais informações do que os de *ordenamento simples*, porque ele envolve a cardinalidade. Porém, ele possui a vantagem de não restringir os valores a um intervalo. Nesse tipo de método, a inércia psicológica do decisor pode influenciar todo processo e resultar numa incoerência que é difícil de eliminar.

De acordo com Vieli (1984) *apud* Pomerol e Romero (2000), a estimativa de pesos varia quando o decisor é questionado em momentos diferentes. Uma variação da escala utilizada pode causar modificações nos pesos os quais não estão sempre de acordo com a hipótese da aditividade das preferências.

Churchman e Ackoff (1954) *apud* Pomerol e Romero (2000) foram os primeiros a propor o *método de comparações sucessivas*, o qual se tornou um clássico dos métodos de avaliação direta. Esse método requer um grande esforço do decisor, porém as inconsistências do *método cardinal simples* são eliminadas. Uma das desvantagens desse método é que ele é relativamente complicado, porém isto é facilmente resolvido com o uso de computadores. No entanto, uma outra desvantagem permanece que é o fato de que a informação que o decisor tem de fornecer não é direta.

Para o caso em estudo foi adotada a combinação dos dois métodos de avaliação dos pesos, o método de *ordenamento simples* e a *avaliação cardinal simples*, com o objetivo de promover a coerência entre os dois tipos de avaliações. O método de comparações sucessivas foi descartado pela dificuldade na obtenção dos pesos, o que seria um processo iterativo, dificultado pela distância entre o analista e os decisores locais.

Com o objetivo de coletar as opiniões dos diferentes decisores do caso em estudo, foi proposto um questionário contendo os dois tipos de avaliação, o ordenamento dos critérios de acordo com a preferência de cada decisor e a atribuição de pesos em um intervalo pré-definido, conforme figura 9.2, a seguir.

## Questionário de avaliação da importância relativa de critérios

Assunto: Definição da política de operação da barragem do Bico da Pedra na perspectiva da nova Lei das Águas, isto é, comitê de bacia definindo, de forma participativa e descentralizada, a política de operação da barragem durante período crítico hidrológico.

Nome do Respondente:

Local:

Profissão/Atuação:

Aspectos	Critérios	Ordem de importância de 1 a 7 *
Sociais	Garantia da atividade de lazer no reservatório	
	Atendimento da agricultura familiar a jusante	
Ambientais	Garantia de condições ambientais adequadas do lago	
	Garantia de vazão ambiental mínima a jusante	
Econômicos	Atendimento da demanda dos projetos irrigados	
	Atendimento da demanda dos usuários a jusante	
	Maximização do benefício total com a produção	

\* Sendo 1 o critério mais importante, estabelecer hierarquia entre os critérios (a cada critério deve ser atribuído somente um nível de importância).

Aspectos	Critérios	Nota **
Sociais	Garantia da atividade de lazer no reservatório	
	Atendimento da agricultura familiar a jusante	
Ambientais	Garantia de condições ambientais adequadas do lago	
	Garantia de vazão ambiental mínima a jusante	
Econômicos	Atendimento da demanda dos projetos irrigados	
	Atendimento da demanda dos usuários a jusante	
	Maximização do benefício total com a produção	

\*\* As notas podem variar de 0 a 10. Um critério sem importância teria nota 0 e caso haja somente um critério importante, este teria nota 10. **O somatório das sete notas deve ser igual a 10.**

Observações:

Figura 9.2 - Questionário de avaliação de prioridades

## **10. RESULTADOS OBTIDOS**

Neste capítulo, estão descritos os resultados obtidos com a aplicação das duas metodologias de otimização propostas neste trabalho, a Programação Dinâmica e o ELECTRE III, na escolha da alternativa ótima de regra operacional do reservatório Bico da Pedra, isto é, a distribuição do volume de água disponível entre os diversos usuários da água.

Primeiramente, foi aplicada a técnica de otimização monocritério escolhida, a Programação Dinâmica, conforme formulação descrita no capítulo 8. Portanto, a primeira parte deste capítulo descreve os resultados obtidos com a aplicação dessa técnica.

Na segunda parte, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da análise multicritério, tendo como base os critérios e alternativas escolhidos e descritos no capítulo 9. Para a obtenção da matriz de critérios x alternativas, foram calculados os valores de cada critério para cada alternativa proposta, cada qual com a escala definida no capítulo 9.

Nas duas simulações, foram adotados os níveis iniciais do reservatório de 544m e 545m, visto que, nesses níveis, haveria uma escassez de água no ano de 1999, para o qual existia disponibilidade de dados de demanda detalhados para cada usuário.

### **10.1. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA**

A Programação Dinâmica foi aplicada tendo como base a tabela de benefícios e as demandas individuais de cada usuário para o ano de 1999, definidos no capítulo 8, e a disponibilidade definida por meio de uma análise da garantia de disponibilidade em todo período considerado, conforme demonstrado no capítulo 7.

O volume disponível para a alocação entre os usuários e o volume demandado por eles foi discretizado em intervalos de 50.000 m<sup>3</sup>. A formulação com o volume discretizado foi adotada por ser mais simples do que a formulação contínua. Com isso, a demanda para os diversos usuários ficou com a seguinte configuração, conforme tabela 10.1, adaptada da tabela 8.3.

Tabela 10.1 – Demanda dos usuários utilizada na simulação

Usuários	Cons. Água ( $10^6$ m <sup>3</sup> )
US1	1,60
US2	1,55
US3	0,20
US4	0,30
US5	1,30
US6	0,10
US7	1,50
US8	0,45
TOTAL	7,00

Foram feitas quatro simulações, variando-se a garantia de disponibilidade e o nível inicial do reservatório, para as quais houve escassez de água, conforme mostra a tabela 10.2, a seguir. O volume disponível para os usuários foi calculado subtraindo-se o volume destinado ao atendimento dos usos estabelecidos como restrições.

Tabela 10.2 – Volumes disponíveis utilizados nas simulações

Garantia (%)	NA (m)	Disponibilidade total (m <sup>3</sup> )	Volume disponível para usuários ( $10^6$ m <sup>3</sup> )
100	544	2.433.399	0,70
90	544	3.461.318	1,70
75	544	3.780.376	2,05
100	545	7.874.356	6,15

Os resultados das simulações estão descritos nas tabelas 10.3, 10.4, 10.5 e 10.6, a seguir, as quais explicitam o volume fornecido para cada usuário e o déficit de água de cada um deles.

Tabela 10.3 – Resultado da Programação Dinâmica (N.A. = 544m, Garantia = 100%)

Usuários	Demanda (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Volume Fornecido (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Déficit (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
US1	1,60	0,00	1,60
US2	1,55	0,00	1,55
US3	0,20	0,00	0,20
US4	0,30	0,00	0,30
US5	1,30	0,70	0,60
US6	0,10	0,00	0,10
US7	1,50	0,00	1,50
US8	0,45	0,00	0,45
<b>TOTAL</b>	<b>7,00</b>	<b>0,70</b>	<b>6,30</b>

Tabela 10.4 – Resultado da Programação Dinâmica (N.A. = 544m, Garantia = 90%)

Usuários	Demanda (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Volume Fornecido (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Déficit (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
US1	1,60	0,00	1,60
US2	1,55	0,40	1,15
US3	0,20	0,00	0,20
US4	0,30	0,00	0,30
US5	1,30	1,30	0,00
US6	0,10	0,00	0,10
US7	1,50	0,00	1,50
US8	0,45	0,00	0,45
<b>TOTAL</b>	<b>7,00</b>	<b>1,70</b>	<b>5,30</b>

Tabela 10.5 – Resultado da Programação Dinâmica (N.A. = 544m, Garantia = 70%)

Usuários	Demanda (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Volume Fornecido (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Déficit (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
US1	1,60	0,00	1,60
US2	1,55	0,75	0,80
US3	0,20	0,00	0,20
US4	0,30	0,00	0,30
US5	1,30	1,30	0,00
US6	0,10	0,00	0,10
US7	1,50	0,00	1,50
US8	0,45	0,00	0,45
<b>TOTAL</b>	<b>7,00</b>	<b>2,05</b>	<b>4,95</b>

Tabela 10.6 – Resultado da Programação Dinâmica (N.A. = 545m, Garantia = 100%)

Usuários	Demanda (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Volume Fornecido (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Déficit (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
US1	1,60	1,60	0,00
US2	1,55	1,55	0,00
US3	0,20	0,10	0,10
US4	0,30	0,00	0,30
US5	1,30	1,30	0,00
US6	0,10	0,10	0,00
US7	1,50	1,50	0,00
US8	0,45	0,00	0,45
<b>TOTAL</b>	<b>7,00</b>	<b>6,15</b>	<b>0,85</b>

Os resultados obtidos mostram que, considerando o nível inicial do reservatório igual a 544m, o déficit de água é muito grande para a maioria dos usuários. O usuário 5 é o único que recebe água em todas as alternativas. Diminuindo a garantia de disponibilidade, é possível o atendimento a outros usuários, todos com cultura permanente, porém considerando a possibilidade de ocorrerem falhas no final do período crítico. Portanto, se o reservatório no início do período crítico estiver com o nível d'água igual a 544m, com certeza haverá racionamento de água.

No caso da adoção do nível inicial do reservatório como sendo 545m e a garantia de disponibilidade igual a 100% na simulação, a demanda é quase totalmente atendida, com um déficit de apenas 850.000 m<sup>3</sup>, o qual é dividido entre os usuários que possuem culturas temporárias. Diminuindo-se a garantia de disponibilidade, a demanda é totalmente atendida, não havendo necessidade de otimização da alocação da água, porém existindo o risco de falta de água no final do período.

Procurou-se, com a aplicação da Programação Dinâmica, avaliar a sua adequação a problemas de alocação de água em reservatórios e não se fazer uma representação fidedigna da realidade. Foram identificadas algumas incertezas durante o processo de formulação e obtenção dos dados, como por exemplo, a definição da demanda de água de cada usuário, do consumo de água por cultura e do benefício líquido gerado por cultura.

## **10.2. RESULTADOS DA ANÁLISE MULTIOBJETIVO**

A aplicação da análise multiobjetivo requer o cálculo do valor ou escala de cada critério com relação a todas as alternativas propostas. Para permitir esse cálculo, no caso da análise da operação da barragem do Bico da Pedra, foi feita uma estimativa do volume fornecido para cada usuário em cada uma das alternativas propostas, tomando como premissa dois níveis iniciais do reservatório, conforme pode ser visto nas tabelas 10.7 e 10.8, a seguir.

Ao contrário do que foi feito na aplicação da Programação Dinâmica, o atendimento foi priorizado para as oito classes de usuários estabelecidos, ficando o restante do volume para ser dividido, igualmente, em termos percentuais, entre os outros usos. O atendimento às oito classes de usuários variou de acordo com as possibilidades da estratégia B, estabelecidas no capítulo 9.

O volume disponível para ser distribuído depende das possibilidades das outras duas estratégias, a A e a C, definidas também no capítulo 9. Na estratégia A, o volume disponível varia com a garantia de disponibilidade em todo o período considerado e na estratégia C varia de acordo com o nível inicial do reservatório. Com a combinação dessas duas estratégias, tem-se como estimar o volume disponível para cada alternativa.

Tabela 10.7 – Volume fornecido para cada usuário por alternativa (N.A. inicial = 544m)

Usuários	Volume fornecido (m <sup>3</sup> )											
	I	III	V	VII	IX	XI	XIII	XV	XVII	XIX	XXI	XXIII
	G = 100% A = 100%	G = 100% A = 90% de US7 e US8	G = 100% A = 70% de US8	G = 100% A = 90% de US3, US4, US6 e US7 e 70% de US8	G = 90% A = 100%	G = 90% A = 90% de US7 e US8	G = 90% A = 70% de US8	G = 90% A = 90% de US3, US4, US6 e US7 e 70% de US8	G = 75% A = 100%	G = 75% A = 90% de US7 e US8	G = 75% A = 70% de US8	G = 75% A = 90% de US3, US4, US6 e US7 e 70% de US8
US1	567.417	567.417	567.417	567.417	798.822	798.822	798.822	798.822	881.503	881.503	881.503	881.503
US2	537.962	537.962	537.962	537.962	757.356	757.356	757.356	757.356	835.744	835.744	835.744	835.744
US3	59.261	59.261	59.261	53.335	83.429	83.429	83.429	75.086	92.064	92.064	92.064	82.858
US4	101.026	101.026	101.026	90.923	142.226	142.226	142.226	128.003	156.947	156.947	156.947	141.252
US5	452.174	452.174	452.174	452.174	636.582	636.582	636.582	636.582	702.470	702.470	702.470	702.470
US6	33.356	33.356	33.356	30.021	46.960	46.960	46.960	42.264	51.820	51.820	51.820	46.638
US7	522.962	470.666	522.962	470.666	736.238	662.614	736.238	662.614	812.441	731.197	812.441	731.197
US8	159.241	143.317	111.469	111.469	224.184	201.765	156.929	156.929	247.387	222.649	173.171	173.171
<b>TOTAL USUÁRIOS</b>	<b>2.433.399</b>	<b>2.365.179</b>	<b>2.385.627</b>	<b>2.313.966</b>	<b>3.425.796</b>	<b>3.329.754</b>	<b>3.358.541</b>	<b>3.257.656</b>	<b>3.780.376</b>	<b>3.674.393</b>	<b>3.706.160</b>	<b>3.594.833</b>
Agricultura familiar	0	8.490	5.945	14.863	0	11.952	8.370	20.924	0	13.189	9.236	23.090
Retirada do reservatório	0	16.732	11.717	29.292	0	23.555	16.495	41.238	0	25.993	18.202	45.506
Abastecimento humano e animal	0	15.896	11.132	27.830	0	22.379	15.671	39.179	0	24.696	17.293	43.234
Outros usos	0	2.381	1.667	4.168	0	3.351	2.347	5.867	0	3.698	2.590	6.475
Retirada irregular	0	11.697	8.191	20.477	0	16.467	11.531	28.828	0	18.171	12.725	31.812
Volume mínimo remanescente	0	13.025	9.121	22.803	0	18.337	12.841	32.103	0	20.235	14.170	35.426
<b>TOTAL OUTROS USUÁRIOS</b>	<b>0</b>	<b>68.220</b>	<b>47.772</b>	<b>119.433</b>	<b>0</b>	<b>96.042</b>	<b>67.255</b>	<b>168.140</b>	<b>0</b>	<b>105.983</b>	<b>74.216</b>	<b>185.543</b>
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>2.433.399</b>	<b>2.433.399</b>	<b>2.433.399</b>	<b>2.433.399</b>	<b>3.425.796</b>	<b>3.425.796</b>	<b>3.425.796</b>	<b>3.425.796</b>	<b>3.780.376</b>	<b>3.780.376</b>	<b>3.780.376</b>	<b>3.780.376</b>

Tabela 10.8 – Volume fornecido para cada usuário por alternativa (N.A. inicial = 545m)

Usuários	Volume fornecido (m³)											
	II	IV	VI	VIII	X	XII	XIV	XVI	XVIII	XX	XXII	XXIV
	G = 100% A = 100%	G = 100% A = 90% de US7 e US8	G = 100% A = 70% de US8	G = 100% A = 90% de US3, US4, US6 e US7 e 70% de US8	G = 90% A = 100%	G = 90% A = 90% de US7 e US8	G = 90% A = 70% de US8	G = 90% A = 90% de US3, US4, US6 e US7 e 70% de US8	G = 75% A = 100%	G = 75% A = 90% de US7 e US8	G = 75% A = 70% de US8	G = 75% A = 90% de US3, US4, US6 e US7 e 70% de US8
US1	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008	1.599.008
US2	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004	1.516.004
US3	167.000	167.000	167.000	150.300	167.000	167.000	167.000	150.300	167.000	167.000	167.000	150.300
US4	284.695	284.695	284.695	256.226	284.695	284.695	284.695	256.226	284.695	284.695	284.695	256.226
US5	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250	1.274.250
US6	94.000	94.000	94.000	84.600	94.000	94.000	94.000	84.600	94.000	94.000	94.000	84.600
US7	1.473.733	1.326.360	1.473.733	1.326.360	1.473.733	1.326.360	1.473.733	1.326.360	1.473.733	1.326.360	1.473.733	1.326.360
US8	448.750	403.875	314.125	314.125	448.750	403.875	314.125	314.125	448.750	403.875	314.125	314.125
<b>TOTAL USUÁRIOS</b>	<b>6.857.441</b>	<b>6.665.193</b>	<b>6.722.816</b>	<b>6.520.873</b>	<b>6.857.441</b>	<b>6.665.193</b>	<b>6.722.816</b>	<b>6.520.873</b>	<b>6.857.441</b>	<b>6.665.193</b>	<b>6.722.816</b>	<b>6.520.873</b>
Agricultura familiar	126.551	150.476	143.305	168.436	217.598	217.598	217.598	217.598	217.598	217.598	217.598	217.598
Retirada do reservatório	249.409	296.560	282.427	331.956	428.846	428.846	428.846	428.846	428.846	428.846	428.846	428.846
Abastecimento humano e animal	236.957	281.753	268.326	315.382	407.435	407.435	407.435	407.435	407.435	407.435	407.435	407.435
Outros usos	35.486	42.194	40.183	47.230	61.016	61.016	61.016	61.016	61.016	61.016	61.016	61.016
Retirada irregular	174.353	207.314	197.434	232.058	299.791	299.791	299.791	299.791	299.791	299.791	299.791	299.791
Volume mínimo remanescente	194.161	230.867	219.865	258.422	333.850	333.850	333.850	333.850	333.850	333.850	333.850	333.850
<b>TOTAL OUTROS USUÁRIOS</b>	<b>1.016.915</b>	<b>1.209.164</b>	<b>1.151.540</b>	<b>1.353.483</b>	<b>1.748.536</b>	<b>1.748.536</b>	<b>1.748.536</b>	<b>1.748.536</b>	<b>1.748.536</b>	<b>1.748.536</b>	<b>1.748.536</b>	<b>1.748.536</b>
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>7.874.356</b>	<b>7.874.356</b>	<b>7.874.356</b>	<b>7.874.356</b>	<b>8.605.977</b>	<b>8.413.729</b>	<b>8.471.352</b>	<b>8.269.409</b>	<b>8.605.977</b>	<b>8.413.729</b>	<b>8.471.352</b>	<b>8.269.409</b>

A tabela 10.9, a seguir, mostra o resumo do volume fornecido por alternativa, juntamente com a disponibilidade e a demanda. Com isso, calculou-se o déficit de água para cada alternativa.

Tabela 10.9 – Resumo do volume fornecido por alternativa

Alternativas	Disponibilidade (m³)	Demanda (m³)	Volume fornecido (m³)	Déficit (m³)
Alternativa I	2.433.399	8.605.977	2.433.399	6.172.578
Alternativa II	7.874.356	8.605.977	7.874.356	731.621
Alternativa III	2.433.399	8.413.729	2.433.399	5.980.330
Alternativa IV	7.874.356	8.413.729	7.874.356	539.373
Alternativa V	2.433.399	8.471.352	2.433.399	6.037.953
Alternativa VI	7.874.356	8.471.352	7.874.356	596.996
Alternativa VII	2.433.399	8.269.409	2.433.399	5.836.010
Alternativa VIII	7.874.356	8.269.409	7.874.356	395.053
Alternativa IX	3.425.796	8.605.977	3.425.796	5.180.181
Alternativa X	8.909.198	8.605.977	8.605.977	0
Alternativa XI	3.425.796	8.413.729	3.425.796	4.987.933
Alternativa XII	8.909.198	8.413.729	8.413.729	0
Alternativa XIII	3.425.796	8.471.352	3.425.796	5.045.556
Alternativa XIV	8.909.198	8.471.352	8.471.352	0
Alternativa XV	3.425.796	8.269.409	3.425.796	4.843.613
Alternativa XVI	8.909.198	8.269.409	8.269.409	0
Alternativa XVII	3.780.376	8.605.977	3.780.376	4.825.601
Alternativa XVIII	9.260.332	8.605.977	8.605.977	0
Alternativa XIX	3.780.376	8.413.729	3.780.376	4.633.353
Alternativa XX	9.260.332	8.413.729	8.413.729	0
Alternativa XXI	3.780.376	8.471.352	3.780.376	4.690.976
Alternativa XXII	9.260.332	8.471.352	8.471.352	0
Alternativa XXIII	3.780.376	8.269.409	3.780.376	4.489.033
Alternativa XXIV	9.260.332	8.269.409	8.269.409	0

Com o cálculo do volume fornecido para cada usuário em cada uma das alternativas, foi possível a valoração dos critérios de acordo com escalas numéricas ou algébricas pré-definidas no capítulo 9. O resultado dessa valoração gerou uma matriz critério x alternativas para cada nível inicial do reservatório, mostradas nas tabelas 10.10 e 10.11, seguintes.

Tabela 10.10 – Matriz critérios x alternativas (N.A. inicial = 544m)

Critérios		Alternativas											
		I	III	V	VII	IX	XI	XIII	XV	XVII	XIX	XXI	XXIII
Sociais	1. Intensidade de atividades de lazer	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2
	2. Percentual de atendimento da agricultura familiar (áreas a jusante do reservatório)	0,00	4,00	3,00	7,00	0,00	6,00	4,00	10,00	0,00	6,00	4,00	11,00
Ambientais	3. Minimização do deplecionamento	543,86	543,86	543,86	543,86	543,68	543,68	543,68	543,68	543,61	543,61	543,61	543,61
	4. Percentual de atendimento da vazão remanescente	0,00	4,00	3,00	7,00	0,00	6,00	4,00	10,00	0,00	6,00	4,00	11,00
Econômicos	5. Garantia do abastecimento de água para o Distrito	3,55	3,55	3,55	3,51	4,00	4,00	4,00	3,94	3,51	3,51	3,51	3,45
	6. Garantia de abastecimento de água para usuários a jusante (agricultura patronal)	3,55	3,19	3,30	3,03	4,00	3,50	3,65	3,26	3,51	2,96	3,13	2,70
	7. Maximização do benefício com a irrigação	16,31	15,85	15,99	15,51	22,96	22,32	22,51	21,84	25,34	24,63	24,84	24,10

Tabela 10.11 – Matriz critérios x alternativas (N.A. inicial = 545m)

Critérios		Alternativas											
		II	IV	VI	VIII	X	XII	XIV	XVI	XVIII	XX	XXII	XXIV
Sociais	1. Intensidade de atividades de lazer	7	6	4	6	5	5	5	7	5	5	5	7
	2. Percentual de atendimento da agricultura familiar (áreas a jusante do reservatório)	58,00	69,00	66,00	77,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Ambientais	3. Minimização do deplecionamento	544,09	544,09	544,09	544,09	543,95	543,99	543,98	544,01	543,95	543,99	543,98	544,01
	4. Percentual de atendimento da vazão remanescente	58,00	69,00	66,00	77,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Econômicos	5. Garantia do abastecimento de água para o Distrito	10,00	10,00	10,00	9,89	9,00	9,00	9,00	8,89	8,00	8,00	8,00	7,89
	6. Garantia de abastecimento de água para usuários a jusante (agricultura patronal)	10,00	9,00	9,30	8,53	9,00	8,00	8,30	7,53	8,00	7,00	7,30	6,53
	7. Maximização do benefício com a irrigação	45,97	44,68	45,06	43,71	45,97	44,68	45,06	43,71	45,97	44,68	45,06	43,71

Para permitir a aplicação do ELECTRE III, foram definidos os limiares de *indiferença* ( $q_i$ ), de *preferência* ( $p_i$ ) e de *veto* ( $v_i$ ), em termos absolutos, para cada um dos critérios propostos e para cada nível inicial do reservatório, conforme tabelas 10.12 e 10.13, visto que os valores dos critérios são muito diferentes considerando cada um dos níveis iniciais do reservatório.

Tabela 10.12 – Limiares atribuídos para cada critério (N.A. inicial = 544m)

Critérios		$q_i$	$p_i$	$v_i$
Sociais	1. Intensidade de atividades de lazer	0	0,5	1,5
	2. Percentual de atendimento da agricultura familiar (áreas a jusante do reservatório)	2	5	10
Ambientais	3. Minimização do deplecionamento	0,05	0,1	0,2
	4. Percentual de atendimento da vazão remanescente	2	5	10
Econômicos	5. Garantia do abastecimento de água para o Distrito	0,05	0,2	0,5
	6. Garantia de abastecimento de água para usuários a jusante (agricultura patronal)	0,05	0,2	0,5
	7. Maximização do benefício com a irrigação	1	5	9

Tabela 10.13 – Limiares atribuídos para cada critério (N.A. inicial = 545m)

Critérios		$q_i$	$p_i$	$v_i$
Sociais	1. Intensidade de atividades de lazer	0	1	2
	2. Percentual de atendimento da agricultura familiar (áreas a jusante do reservatório)	5	20	40
Ambientais	3. Minimização do deplecionamento	0	0,05	0,1
	4. Percentual de atendimento da vazão remanescente	5	20	40
Econômicos	5. Garantia do abastecimento de água para o Distrito	0,15	1	2
	6. Garantia de abastecimento de água para usuários a jusante (agricultura patronal)	0,30	2	3
	7. Maximização do benefício com a irrigação	0,4	0,95	1

Podem existir imperfeições na atribuição de limiares aos critérios devido à subjetividade inerente à escolha feita pelo analista. Porém, a influência dessas incertezas no resultado final pode ser posteriormente avaliada, em parte, com processo de análise da sensibilidade.

A importância relativa de cada critério foi atribuída pelos decisores, os quais estão agrupados em cinco classes, conforme definido no capítulo 9. Foram utilizados dois métodos de avaliação dos pesos, o de *ordenamento simples* e a *avaliação cardinal simples*, porém, apenas a *avaliação cardinal simples* será aplicada na simulação. Os dados relativos ao *ordenamento simples* serviram apenas como balizadores para avaliação da escolha do decisor.

Na coleta das notas, não foi possível a obtenção da opinião do Grupo III, irrigantes localizados a jusante da barragem. Portanto, a simulação levará em consideração apenas quatro grupos decisores, conforme tabela 10.14, seguinte. O cálculo do peso resultante dos diversos decisores de cada grupo foi feito como sendo a média dos valores atribuídos por cada decisor, desprezando-se, se for o caso, o valor mais discrepante da série.

A simulação do modelo foi feita atribuindo os pesos de cada grupo decisor separadamente. Com isso, pôde-se comparar as semelhanças e diferenças de cada solução obtida com a opinião dos decisores. Posteriormente, de posse da matriz de credibilidade de cada grupo, foi gerada uma matriz-resultado com os valores mínimos atribuídos pelo conjunto dos grupos decisores para cada par de alternativas e por cada nível inicial do reservatório. Essa matriz poderia ser entendida como uma matriz de avaliação consensual para os diferentes grupos decisores. Portanto, foram feitas oito simulações, quatro para cada nível inicial do reservatório, e foram obtidas duas matrizes-resultado.

O cálculo da matriz de credibilidade e do ordenamento das alternativas foi feito no software desenvolvido pelo LAMSADE – Laboratoire D’analyse et Modelisation de Systeme pour L’aide a la Decision da Dauphine University, versão 2.1 de dezembro de 1989.

Para permitir o cálculo, foram necessários os seguintes dados de entrada: critérios, alternativas, valor atribuído a cada critério referente a cada alternativa, limiares de indiferença, preferência e veto, pesos atribuídos pelos grupos decisores, dentre outros.

Tabela 10.14 – Notas atribuídas por cada representante dos grupos decisores

Grupos decisores	Representante	Critérios						
		1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º
Grupo I	Gerente do DIG	0	0	0	2	8	0	0
	Presidente da ASSIEG	0	1	0	2	7	0	0
	Produtor rural do PG	0	1	1	1	3	3	1
	Produtor rural do PG	0	0	0	0	7	2	1
	Produtor rural do PG	0	2	0	3	3	2	0
<i>Pesos atribuídos pelo Grupo I</i>		<i>0</i>	<i>0.5</i>	<i>0</i>	<i>1.6</i>	<i>5.0</i>	<i>1.4</i>	<i>0.4</i>
Grupo II	Prefeito de Nova Porteirinha	0	2	0	0	5	2	1
<i>Pesos atribuídos pelo Grupo II</i>		<i>0</i>	<i>2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>5</i>	<i>2</i>	<i>1</i>
Grupo IV	Presidente do CODEMA de Nova Porteirinha	0	1	3	1	4	1	0
<i>Pesos atribuídos pelo Grupo IV</i>		<i>0</i>	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>4</i>	<i>1</i>	<i>0</i>
Grupo V	Técnico de Piscicultura	0	1	1	2	3	2	1
	Técnico da PLANTEC	0	0	1	1	5	2	1
	Superintendente da 1ª SR	0	1	1	1	3	3	1
	Engº Agrônomo	1	0	3	2	3	1	0
	Coordenação de operação e manutenção	1	0	5	0	4	0	0
<i>Pesos atribuídos pelo Grupo V</i>		<i>0.4</i>	<i>0.4</i>	<i>1.5</i>	<i>1.5</i>	<i>3.3</i>	<i>2.0</i>	<i>0.6</i>

Os resultados obtidos com as simulações são os seguintes:

*a) Para o nível de 544m e Grupo I*

A matriz de credibilidade obtida com a simulação está apresentada na tabela 10.15, a seguir, e o ordenamento das alternativas está demonstrado graficamente na figura 10.1. Nesse grupo, o critério que possui maior peso é o critério 5, garantia de abastecimento de água para o distrito, seguido dos critérios 4 e 6. A alternativa melhor classificada é a alternativa XIII, a qual possui o maior valor do critério 5 e valores relativamente altos nos critérios 4 e 6. As alternativas classificadas em segundo lugar, alternativas XI e XV, também possuem valores elevados nos critérios supramencionados. As alternativas V e VII foram consideradas as piores alternativas deste conjunto, porque os valores dos critérios com maior peso para essas alternativas são os mais baixos.

Tabela 10.15 – Matriz de credibilidade (N.A. = 544m e Grupo I)

	I	III	V	VII	IX	XI	XIII	XV	XVII	XIX	XXI	XXIII
I	1,000	0,842	0,943	0,764	0,036	0,056	0,086	0,004	0,955	0,719	0,827	0,000
III	0,843	1,000	0,948	0,943	0,000	0,890	0,033	0,081	0,368	0,955	0,955	0,719
V	0,843	1,000	1,000	0,872	0,000	0,075	0,075	0,067	0,526	0,898	0,955	0,719
VII	0,488	0,900	0,843	1,000	0,000	0,017	0,000	0,078	0,063	0,955	0,912	0,827
IX	1,000	0,872	0,943	0,764	1,000	0,764	0,872	0,454	0,987	0,758	0,864	0,000
XI	1,000	1,000	1,000	1,000	0,814	1,000	0,910	0,872	0,980	0,988	0,985	0,793
XIII	1,000	1,000	1,000	0,943	0,843	1,000	1,000	0,764	0,982	0,990	0,987	0,759
XV	0,843	1,000	1,000	1,000	0,000	0,826	0,826	1,000	0,818	0,983	0,981	0,988
XVII	1,000	0,872	0,943	0,764	0,018	0,046	0,054	0,005	1,000	0,764	0,872	0,000
XIX	0,000	0,843	0,843	0,986	0,000	0,003	0,000	0,059	0,000	1,000	0,891	0,800
XXI	0,843	0,996	0,891	0,943	0,000	0,054	0,009	0,055	0,843	1,000	1,000	0,764
XXIII	0,000	0,405	0,000	0,826	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,826	0,826	1,000

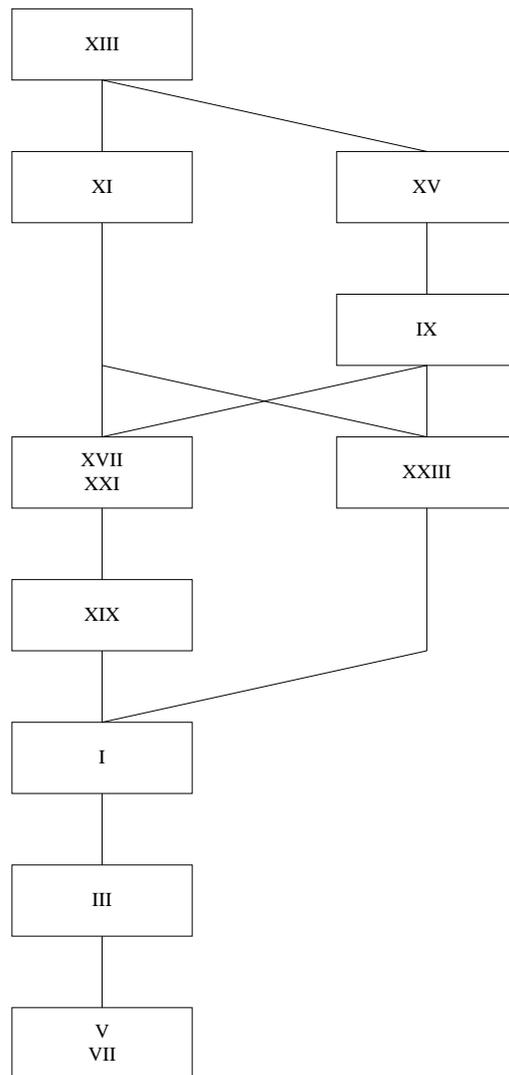


Figura 10.1 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m e Grupo I)

*b) Para o nível de 544m e Grupo II*

A matriz de credibilidade obtida com a simulação está demonstrada na tabela 10.16, a seguir, e o ordenamento das alternativas está demonstrado graficamente na figura 10.2. A ponderação dos critérios feita por este grupo foi semelhante ao anterior, diferindo apenas no fato de que o critério 4 teve um peso igual a zero e o segundo maior valor foi atribuído ao critério 2. Com isso, houve uma pequena alteração no ordenamento geral das alternativas, porém os três primeiros colocados na classificação continuaram sendo os mesmos do grupo anterior. A alternativa V subiu uma classificação em relação à avaliação do grupo I.

Tabela 10.16 – Matriz de credibilidade (N.A. = 544m e Grupo II)

	I	III	V	VII	IX	XI	XIII	XV	XVII	XIX	XXI	XXIV
I	1,000	0,891	0,952	0,800	0,027	0,076	0,094	0,027	0,900	0,700	0,791	0,000
III	0,800	1,000	0,933	0,952	0,000	0,067	0,024	0,108	0,217	0,900	0,900	0,700
V	0,800	1,000	1,000	0,891	0,000	0,064	0,056	0,110	0,309	0,852	0,900	0,700
VII	0,364	0,873	0,800	1,000	0,000	0,012	0,000	0,062	0,026	0,900	0,706	0,791
IX	1,000	0,891	0,952	0,800	1,000	0,800	0,891	0,727	0,971	0,787	0,873	0,000
XI	1,000	1,000	1,000	1,000	0,606	1,000	0,885	0,891	0,956	0,973	0,968	0,815
XIII	1,000	1,000	1,000	0,952	0,800	1,000	1,000	0,800	0,961	0,977	0,972	0,789
XV	0,800	1,000	1,000	1,000	0,000	0,785	0,785	1,000	0,745	0,962	0,957	0,974
XVII	1,000	0,891	0,952	0,800	0,020	0,078	0,074	0,041	1,000	0,800	0,891	0,000
XIX	0,000	0,800	0,800	0,982	0,000	0,003	0,000	0,081	0,000	1,000	0,861	0,830
XXI	0,800	0,994	0,861	0,952	0,000	0,061	0,010	0,096	0,800	1,000	1,000	0,800
XXIV	0,000	0,359	0,000	0,785	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,785	0,785	1,000

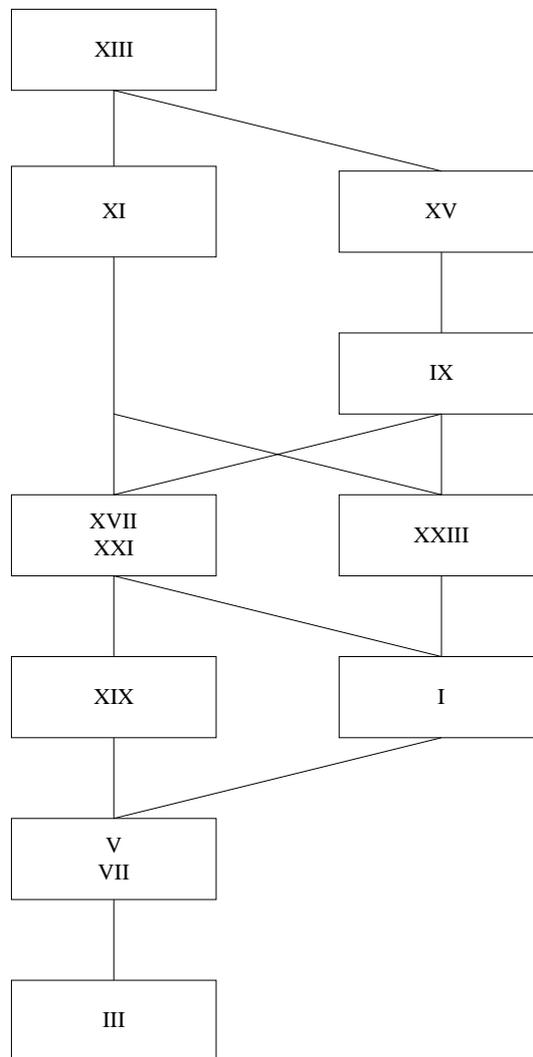


Figura 10.2 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m e Grupo II)

*c) Para o nível de 544m e Grupo IV*

A matriz de credibilidade obtida com a simulação está demonstrada na tabela 10.17, a seguir, e o ordenamento das alternativas está demonstrado graficamente na figura 10.3. A classificação final obtida para este grupo é sensivelmente diferente das duas primeiras, visto que o peso atribuído ao critério 3, que era zero nas duas primeiras avaliações, ficou sendo três. Portanto, os critérios com maior peso foram os critérios 5 e 3. Com isso, a alternativa melhor classificada foi a XV, mesmo com os valores destes critérios sendo iguais ou menores que o das outras alternativas, pois a ponderação alta dos critérios 2, 4 e 6 juntos contribuiu para a sua escolha. A classificação da pior alternativa também sofreu mudanças significativas, sendo a alternativa XXI a pior classificada, por possuir o menor valor para o critério 3.

Tabela 10.17 – Matriz de credibilidade (N.A. = 544m e Grupo IV)

	I	III	V	VII	IX	XI	XIII	XV	XVII	XIX	XXI	XXIV
I	1,000	0,890	0,952	0,800	0,184	0,202	0,261	0,030	1,000	0,800	0,890	0,000
III	0,900	1,000	0,967	0,952	0,000	0,303	0,165	0,311	0,900	1,000	1,000	0,800
V	0,900	1,000	1,000	0,890	0,000	0,262	0,303	0,323	0,906	0,952	1,000	0,800
VII	0,818	0,936	0,900	1,000	0,000	0,088	0,000	0,300	0,900	1,000	0,973	0,890
IX	0,700	0,523	0,652	0,364	1,000	0,800	0,890	0,661	1,000	0,800	0,890	0,000
XI	0,700	0,700	0,700	0,700	0,900	1,000	0,942	0,890	1,000	1,000	1,000	0,830
XIII	0,700	0,700	0,700	0,652	0,900	1,000	1,000	0,800	1,000	1,000	1,000	0,800
XV	0,546	0,700	0,700	0,700	0,000	0,888	0,888	1,000	0,900	1,000	1,000	1,000
XVII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,041	0,085	0,101	0,012	1,000	0,800	0,890	0,000
XIX	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,162	0,000	1,000	0,930	0,830
XXI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,123	0,020	0,137	0,900	1,000	1,000	0,800
XXIV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,888	0,888	1,000

*d) Para o nível de 544m e Grupo V*

A matriz de credibilidade obtida com a simulação está demonstrada na tabela 10.18, a seguir, e o ordenamento das alternativas está demonstrado graficamente na figura 10.4. Nesse caso, as alternativas melhor classificadas foram as XIII e a XV, a primeira melhor classificada pelos grupos I e II e a segunda melhor classificada pelo grupo IV. Os valores dos pesos atribuídos por este grupo estão distribuídos entre os critérios, não havendo nenhum critério com o peso zero. Em relação às alternativas piores classificadas, tem-se outra mudança significativa com relação às outras três avaliações. A alternativa pior classificada foi a XIX, a qual estava

classificada em quinto lugar nas duas primeiras avaliações e em sétimo lugar na terceira avaliação.

Tabela 10.18 – Matriz de credibilidade (N.A. = 544m e Grupo V)

	I	III	V	VII	IX	XI	XIII	XV	XVII	XIX	XXI	XXIV
I	1,000	0,893	0,952	0,804	0,097	0,204	0,233	0,030	0,938	0,742	0,831	0,000
III	0,794	1,000	0,931	0,952	0,000	0,195	0,087	0,301	0,255	0,938	0,938	0,742
V	0,794	1,000	1,000	0,893	0,000	0,177	0,194	0,326	0,363	0,890	0,938	0,742
VII	0,350	0,569	0,794	1,000	0,000	0,047	0,000	0,191	0,034	0,938	0,882	0,831
IX	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,804	0,893	0,692	0,941	0,755	0,841	0,000
XI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,584	1,000	0,881	0,893	0,932	0,942	0,939	0,782
XIII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,794	1,000	1,000	0,804	0,935	0,945	0,942	0,756
XV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,784	0,784	1,000	0,719	0,935	0,932	0,943
XVII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039	0,132	0,123	0,026	1,000	0,804	0,893	0,000
XIX	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,159	0,000	1,000	0,856	0,833
XXI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,118	0,020	0,177	0,794	1,000	1,000	0,804
XXIV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,784	0,784	1,000

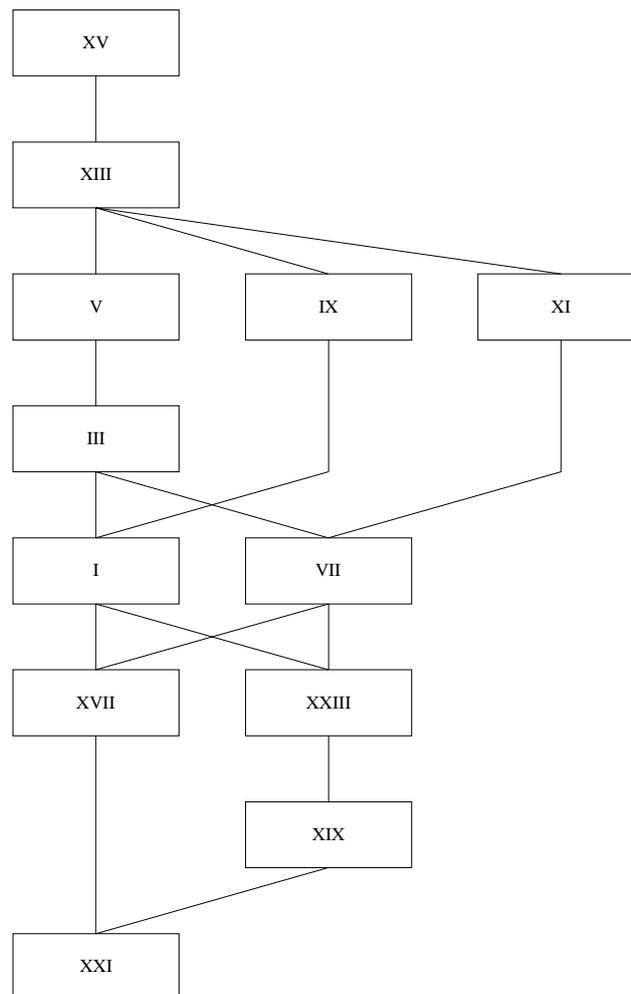


Figura 10.3 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m e Grupo IV)

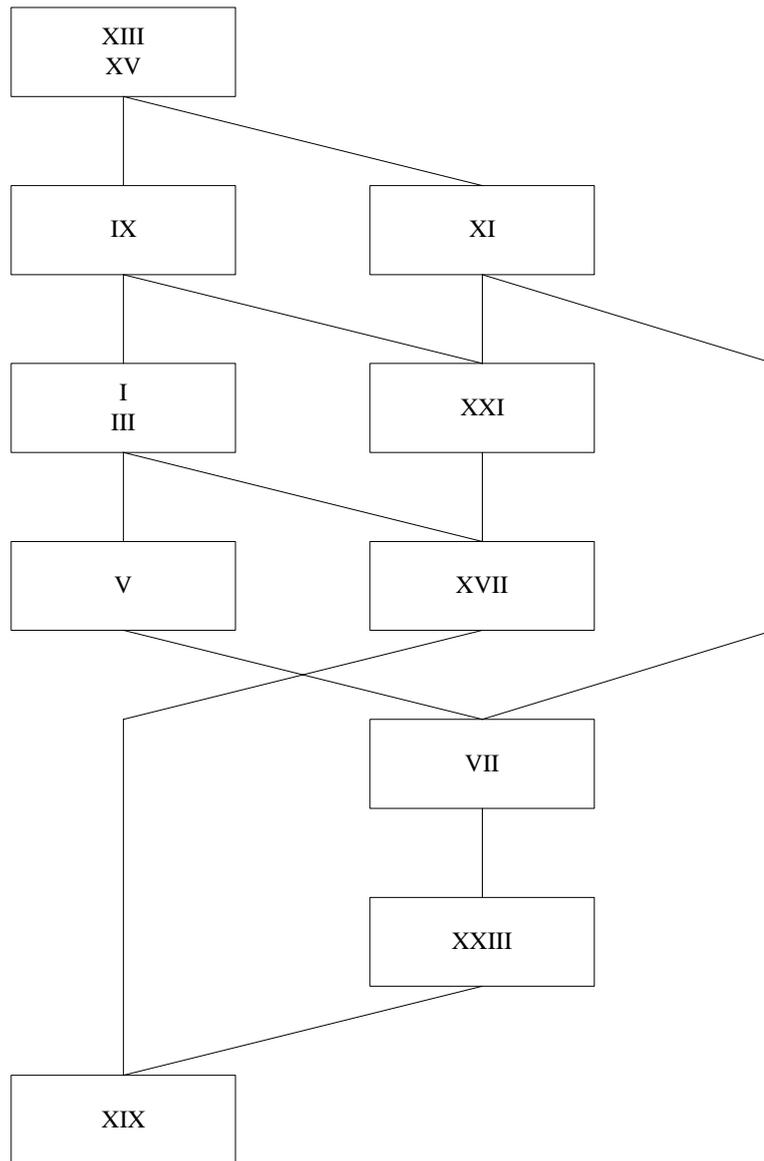


Figura 10.4 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m e Grupo V)

*e) Para o nível de 545m e Grupo I*

A matriz de credibilidade obtida com a simulação está demonstrada na tabela 10.19, a seguir, e o ordenamento das alternativas está demonstrado graficamente na figura 10.5. As alternativas melhor classificadas, levando em consideração os pesos atribuídos pelo grupo I e para um nível inicial de 545m, foram a VI e a X, porque o critério que possui maior peso neste grupo é o critério 5, o qual para estas duas alternativas possui valor alto. Quanto à alternativa pior classificada, a alternativa XXIV, o valor atribuído ao critério 5 foi o menor dentre todas as alternativas, justificando sua classificação.

Tabela 10.19 – Matriz de credibilidade (N.A. = 545m e Grupo I)

	II	IV	VI	VIII	X	XII	XIV	XVI	XVIII	XX	XXII	XXIV
II	1,000	0,921	0,965	0,807	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113
IV	0,000	1,000	1,000	0,965	0,000	0,764	0,764	0,764	0,000	0,764	0,764	0,764
VI	0,934	1,000	1,000	0,921	0,729	0,764	0,764	0,764	0,729	0,764	0,764	0,764
VIII	0,000	0,950	0,000	1,000	0,000	0,725	0,000	0,764	0,000	0,725	0,000	0,764
X	0,442	0,498	0,498	0,564	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
XII	0,000	0,442	0,417	0,547	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000
XIV	0,348	0,467	0,442	0,564	0,934	1,000	1,000	1,000	0,965	1,000	1,000	1,000
XVI	0,000	0,303	0,000	0,442	0,000	0,950	0,000	1,000	0,000	0,961	0,000	1,000
XVIII	0,077	0,112	0,101	0,205	0,442	0,498	0,498	0,564	1,000	1,000	1,000	1,000
XX	0,000	0,077	0,071	0,143	0,000	0,442	0,417	0,547	0,000	1,000	1,000	1,000
XXII	0,043	0,087	0,077	0,161	0,348	0,467	0,442	0,564	0,934	1,000	1,000	1,000
XXIV	0,000	0,026	0,000	0,077	0,000	0,303	0,000	0,442	0,000	0,950	0,000	1,000

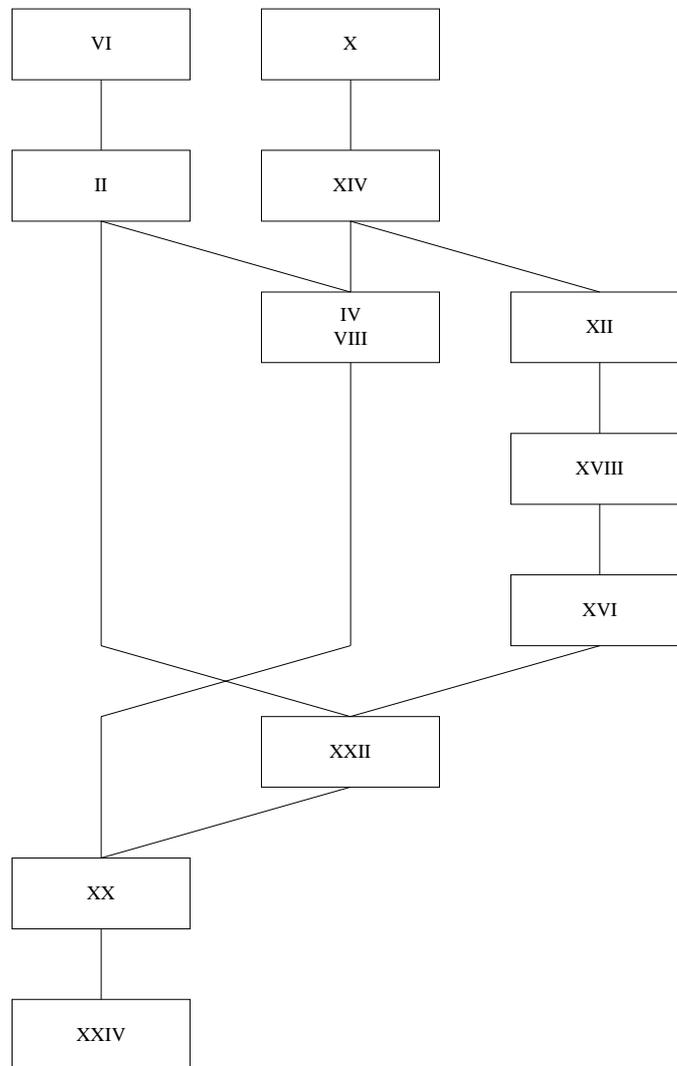


Figura 10.5 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m e Grupo I)

f) Para o nível de 545m e Grupo II

A matriz de credibilidade obtida com a simulação está demonstrada na tabela 10.20, a seguir, e o ordenamento das alternativas está demonstrado graficamente na figura 10.6. A classificação resultante da ponderação dos critérios feita pelo grupo II foi exatamente igual à do grupo I, visto que a variação dos pesos entre estes dois grupos foi pequena.

Tabela 10.20 – Matriz de credibilidade (N.A. = 545m e Grupo II)

	II	IV	VI	VIII	X	XII	XIV	XVI	XVIII	XX	XXII	XXIV
II	1,000	0,933	0,970	0,836	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364
IV	0,000	1,000	1,000	0,970	0,000	0,800	0,800	0,800	0,000	0,800	0,800	0,800
VI	0,882	1,000	1,000	0,933	0,722	0,800	0,800	0,800	0,722	0,800	0,800	0,800
VIII	0,000	0,897	0,000	1,000	0,000	0,712	0,000	0,800	0,000	0,712	0,000	1,000
X	0,481	0,553	0,553	0,612	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
XII	0,000	0,481	0,449	0,591	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000
XIV	0,328	0,513	0,481	0,612	0,882	1,000	1,000	1,000	0,922	1,000	1,000	1,000
XVI	0,000	0,290	0,000	0,481	0,000	0,897	0,000	1,000	0,000	0,912	0,000	1,000
XVIII	0,086	0,136	0,119	0,259	0,481	0,553	0,553	0,612	1,000	1,000	1,000	1,000
XX	0,000	0,086	0,078	0,167	0,000	0,481	0,449	0,591	0,000	1,000	1,000	1,000
XXII	0,036	0,099	0,086	0,191	0,328	0,513	0,481	0,612	0,882	1,000	1,000	1,000
XXIV	0,000	0,021	0,000	0,086	0,000	0,290	0,000	0,481	0,000	0,897	0,000	1,000

g) Para o nível de 545m e Grupo IV

A matriz de credibilidade obtida com a simulação está demonstrada na tabela 10.21, a seguir, e o ordenamento das alternativas está demonstrado graficamente na figura 10.7. Na classificação obtida pela ponderação feita pelo grupo IV, foram melhor classificadas as alternativas IV, VIII, VI, XII e XVI. A alternativa VI continuou sendo a melhor classificada em relação às classificações obtidas pela ponderação dos grupos I e II, porém, a alternativa X ficou classificada em terceiro lugar. Isto se deveu ao fato de que no conjunto de pesos atribuídos por esse grupo, o peso para o critério 3 passou de zero para três, e os outros critérios tiveram os pesos uniformemente distribuídos, ficando o critério 5 ainda com o maior peso. A alternativa X possui o menor valor para o critério 3, dentre as outras alternativas. A alternativa pior classificada também foi alterada, passando da alternativa XXIV para a XVIII, alteração também justificada pelo aumento do peso do critério 3.

Tabela 10.21 – Matriz de credibilidade (N.A. = 545m e Grupo IV)

	II	IV	VI	VIII	X	XII	XIV	XVI	XVIII	XX	XXII	XXIV
II	1,000	0,934	0,970	0,836	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165
IV	0,964	1,000	1,000	0,970	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800
VI	0,980	1,000	1,000	0,934	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800
VIII	0,939	0,993	0,976	1,000	0,793	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800
X	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,782	0,837	0,700	1,000	0,782	0,837	0,700
XII	0,062	0,080	0,074	0,111	0,964	1,000	1,000	0,891	1,000	1,000	1,000	0,891
XIV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,980	0,945	1,000	0,836	1,000	0,945	1,000	0,836
XVI	0,128	0,171	0,156	0,241	0,939	0,993	0,976	1,000	0,993	1,000	1,000	1,000
XVIII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,607	0,425	0,480	0,390	1,000	0,782	0,837	0,700
XX	0,003	0,011	0,010	0,021	0,554	0,607	0,591	0,570	0,964	1,000	1,000	0,891
XXII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,570	0,568	0,607	0,526	0,980	0,945	1,000	0,836
XXIV	0,000	0,013	0,008	0,034	0,500	0,539	0,523	0,607	0,939	0,993	0,976	1,000

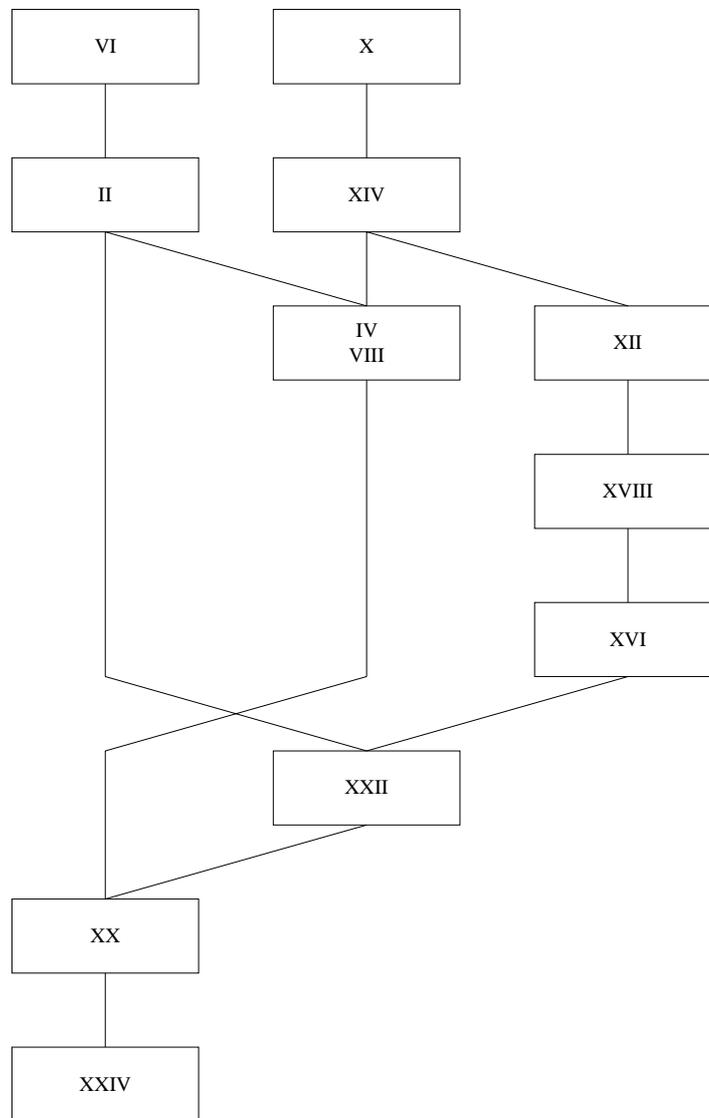


Figura 10.6 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m e Grupo II)

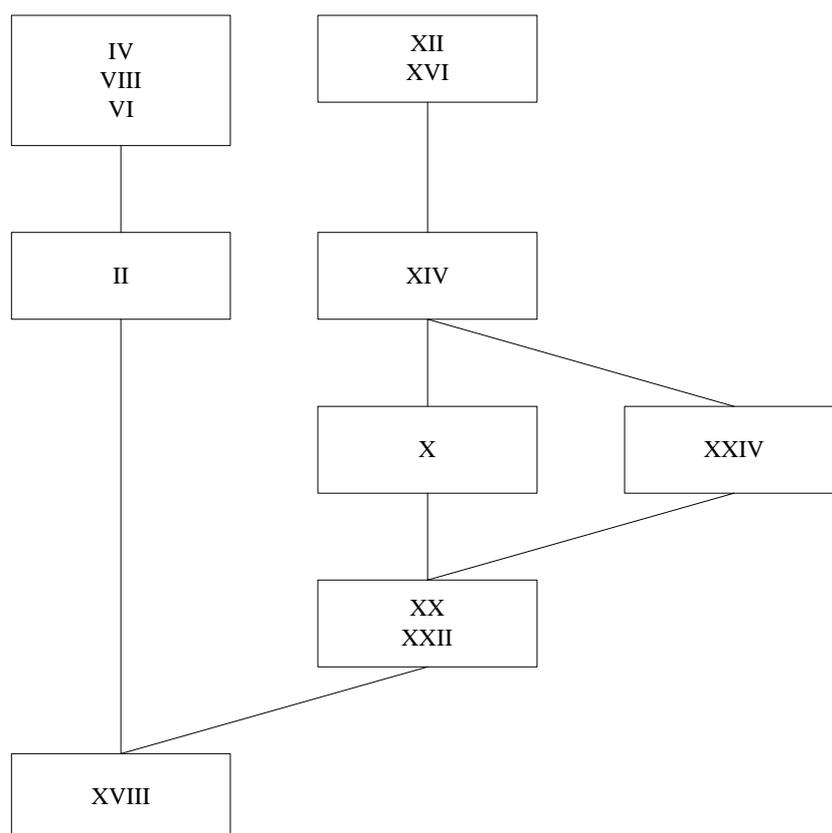


Figura 10.7 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m e Grupo IV)

*h) Para o nível de 545m e Grupo V*

A matriz de credibilidade obtida com a simulação está demonstrada na tabela 10.22, a seguir, e o ordenamento das alternativas está demonstrado graficamente na figura 10.8. A alternativa melhor classificada pelo grupo V foi a alternativa X, semelhantemente à classificação feita pelos grupos I e II, visto que os pesos foram atribuídos uniformemente entre os critérios por este grupo. A alternativa pior classificada foi a XX, a qual foi a penúltima na classificação feita pelos grupos I e II. Portanto, a classificação do grupo V ficou muito semelhante à classificação obtida pela ponderação dos grupos I e II.

Tabela 10.22 – Matriz de credibilidade (N.A. = 545m e Grupo V)

	II	IV	VI	VIII	X	XII	XIV	XVI	XVIII	XX	XXII	XXIV
II	1,000	0,934	0,970	0,839	0,173	0,173	0,173	0,173	0,173	0,173	0,173	0,173
IV	0,000	1,000	1,000	0,970	0,000	0,804	0,804	0,767	0,000	0,804	0,804	0,767
VI	0,000	0,959	1,000	0,893	0,719	0,767	0,767	0,000	0,719	0,767	0,767	0,000
VIII	0,000	0,931	0,000	1,000	0,000	0,750	0,000	0,767	0,000	0,750	0,000	0,767
X	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,887	0,915	0,746	1,000	0,887	0,915	0,746
XII	0,000	0,137	0,139	0,198	0,000	1,000	1,000	0,902	0,000	1,000	1,000	0,902
XIV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,911	0,971	1,000	0,874	0,952	0,971	1,000	0,874
XVI	0,000	0,262	0,000	0,467	0,000	0,931	0,000	1,000	0,000	0,946	0,000	1,000
XVIII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,622	0,583	0,611	0,213	1,000	0,887	0,915	0,746
XX	0,000	0,018	0,020	0,039	0,000	0,622	0,589	0,292	0,000	1,000	1,000	0,902
XXII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,497	0,626	0,622	0,284	0,911	0,971	1,000	0,874
XXIV	0,000	0,019	0,000	0,069	0,000	0,480	0,000	0,622	0,000	0,931	0,000	1,000

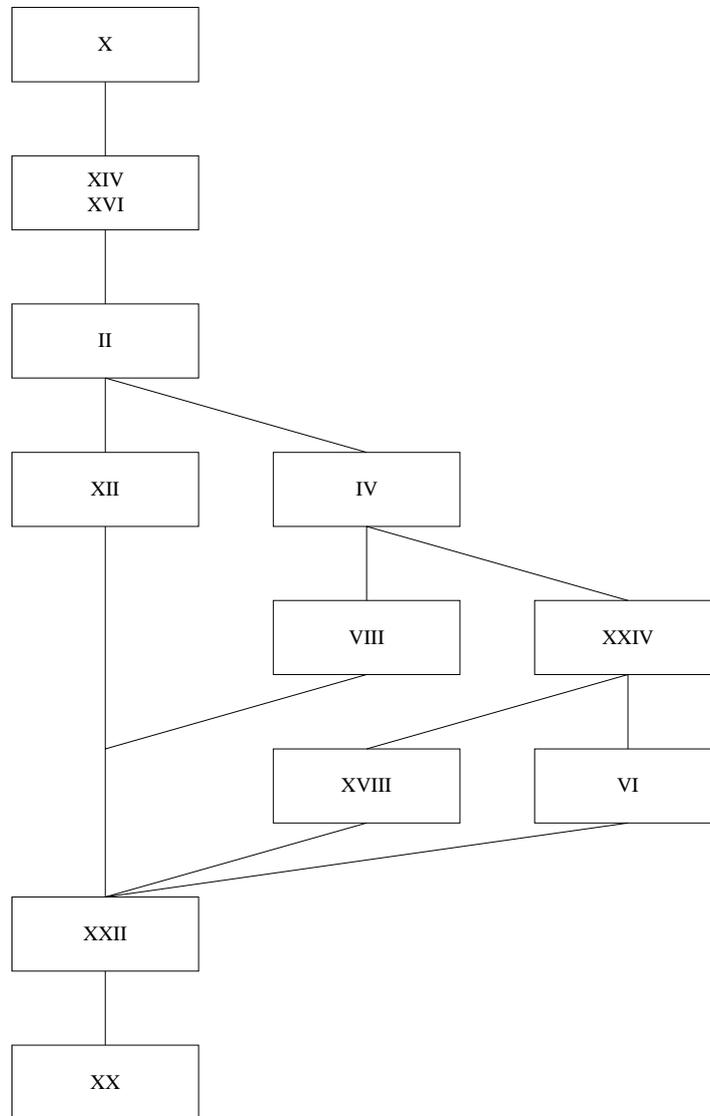


Figura 10.8 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m e Grupo V)

De posse de todos os resultados, foi possível a obtenção da matriz de resultados para os dois níveis iniciais do reservatório, conforme tabelas 10.23 e 10.24. Executando o modelo, tendo como dado de entrada as matrizes de resultados, gerou-se o ordenamento final das alternativas, na opinião de todos os decisores, para cada nível do reservatório, mostrado nas figuras 10.9 e 10.10, a seguir. O resultado final obtido tendo como premissa o nível inicial do reservatório como sendo 544m foi coerente com o ordenamento feito por cada grupo decisor, tendo como alternativas melhor classificadas a XIII e a XV. No caso da adoção do nível inicial do reservatório como sendo 545m, o resultado final foi a escolha da alternativa XIV, a qual ficou classificada em segundo lugar na avaliação feita para os quatro grupos. Isto pode ser explicado pelo fato de que as alternativas classificadas por cada grupo em primeiro lugar foram diferentes, levando portanto à escolha da alternativa classificada em segundo lugar por todos os grupos (resultado consensual).

Tabela 10.23 – Matriz de resultados (N.A. = 544m)

	I	III	V	VII	IX	XI	XIII	XV	XVII	XIX	XXI	XXIV
I	1,000	0,842	0,943	0,764	0,027	0,056	0,086	0,004	0,900	0,700	0,791	0,000
III	0,794	1,000	0,931	0,943	0,000	0,067	0,024	0,081	0,217	0,900	0,900	0,700
V	0,794	1,000	1,000	0,872	0,000	0,064	0,056	0,067	0,309	0,852	0,900	0,700
VII	0,350	0,569	0,794	1,000	0,000	0,012	0,000	0,062	0,026	0,900	0,706	0,791
IX	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,764	0,872	0,454	0,941	0,755	0,841	0,000
XI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,584	1,000	0,881	0,872	0,932	0,942	0,939	0,782
XIII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,794	1,000	1,000	0,764	0,935	0,945	0,942	0,756
XV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,784	0,784	1,000	0,719	0,935	0,932	0,943
XVII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,046	0,054	0,005	1,000	0,764	0,872	0,000
XIX	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,059	0,000	1,000	0,856	0,800
XXI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,054	0,009	0,055	0,794	1,000	1,000	0,764
XXIV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,784	0,784	1,000

Tabela 10.24 – Matriz de resultados (N.A. = 545m)

	II	IV	VI	VIII	X	XII	XIV	XVI	XVIII	XX	XXII	XXIV
II	1,000	0,921	0,965	0,807	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113
IV	0,000	1,000	1,000	0,965	0,000	0,764	0,764	0,764	0,000	0,764	0,764	0,764
VI	0,000	0,959	1,000	0,893	0,719	0,764	0,764	0,000	0,719	0,764	0,764	0,000
VIII	0,000	0,897	0,000	1,000	0,000	0,712	0,000	0,764	0,000	0,712	0,000	0,764
X	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,782	0,837	0,700	1,000	0,782	0,837	0,700
XII	0,000	0,080	0,074	0,111	0,000	1,000	1,000	0,891	0,000	1,000	1,000	0,891
XIV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,882	0,945	1,000	0,836	0,922	0,945	1,000	0,836
XVI	0,000	0,171	0,000	0,241	0,000	0,897	0,000	1,000	0,000	0,912	0,000	1,000
XVIII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,442	0,425	0,480	0,213	1,000	0,782	0,837	0,700
XX	0,000	0,011	0,010	0,021	0,000	0,442	0,417	0,292	0,000	1,000	1,000	0,891
XXII	0,000	0,000	0,000	0,000	0,328	0,467	0,442	0,284	0,882	0,945	1,000	0,836
XXIV	0,000	0,013	0,000	0,034	0,000	0,290	0,000	0,442	0,000	0,897	0,000	1,000

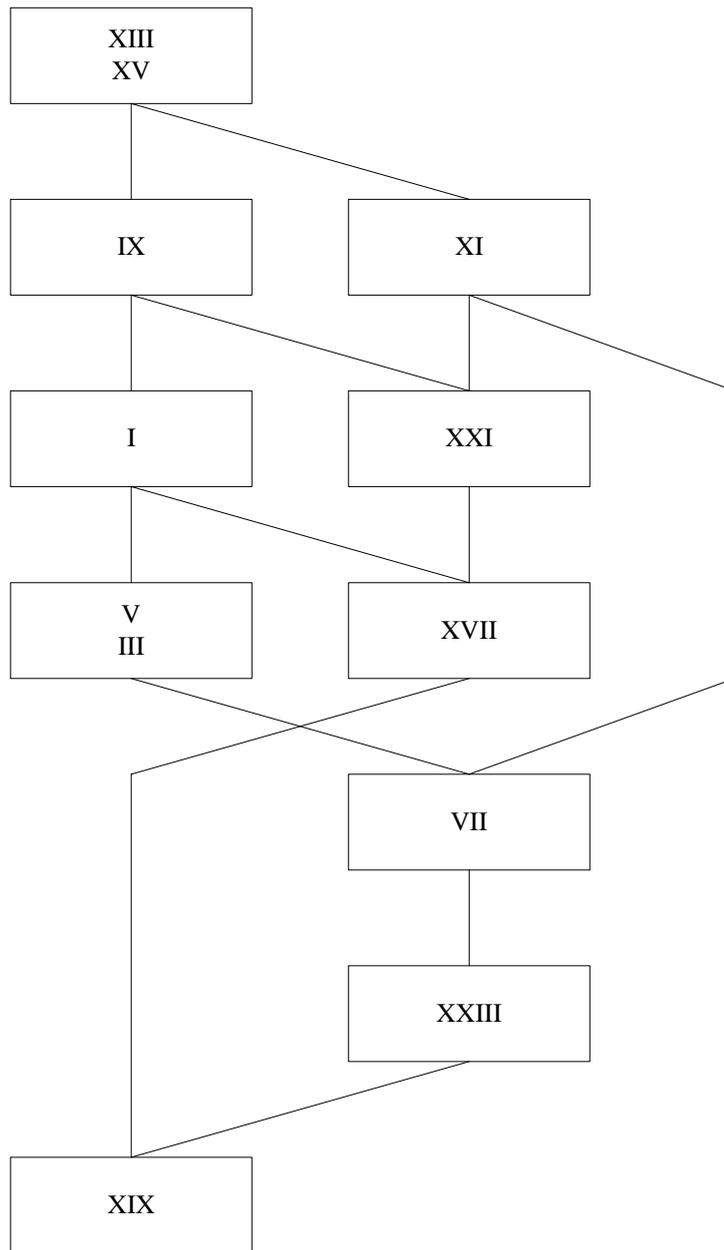


Figura 10.9 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 544m)

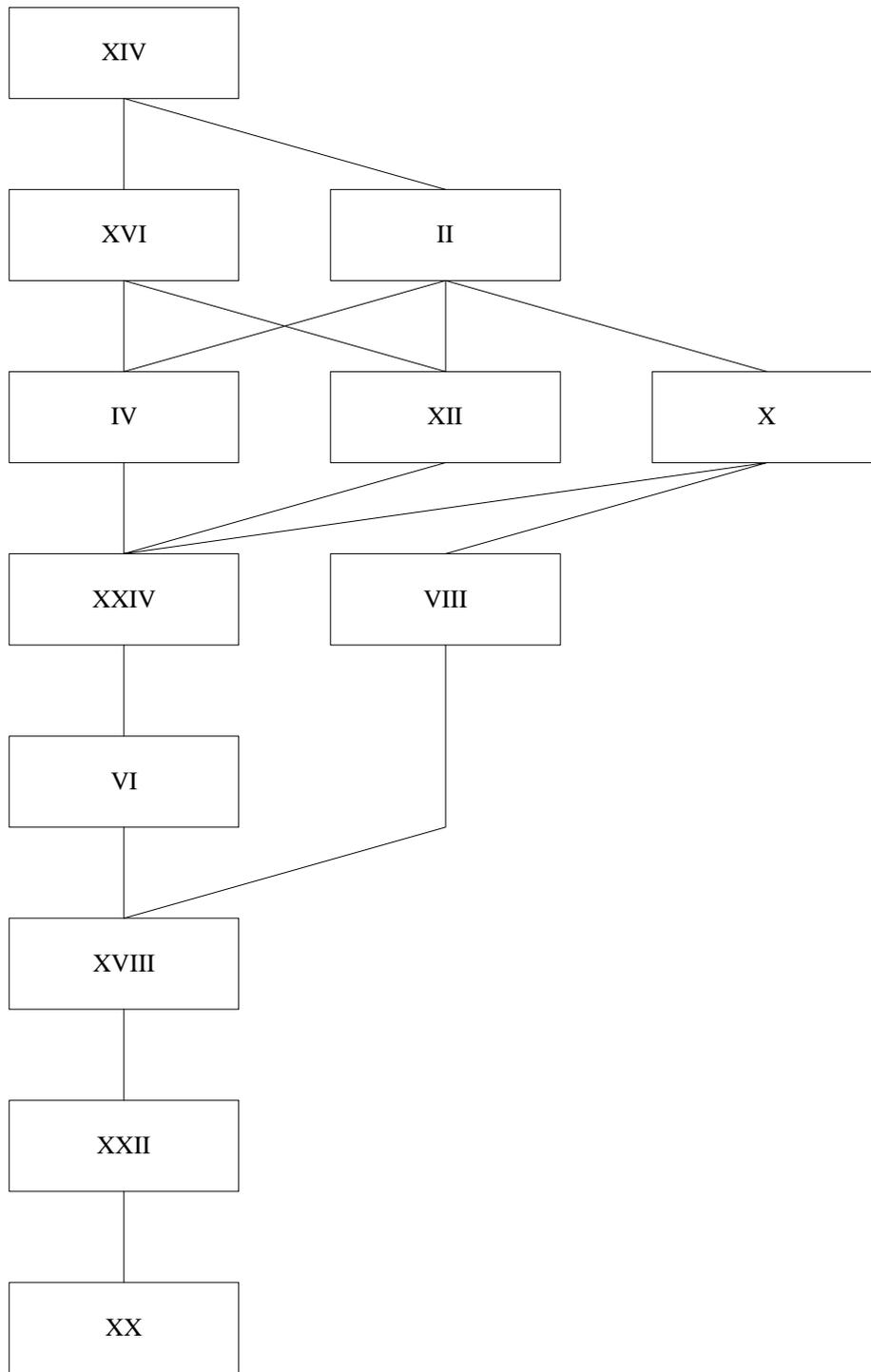


Figura 10.10 – Ordenamento final das alternativas (N.A. = 545m)

## **11. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo, são feitas algumas considerações a respeito dos resultados obtidos com a aplicação dos dois tipos de modelo, monocritério e multicritério, na determinação da política operativa ótima da barragem do Bico da Pedra.

As premissas adotadas na aplicação de cada um dos modelos foram diferentes. Na formulação da Programação Dinâmica, a otimização foi feita entre os oito usuários mais significativos da região, identificados no capítulo 8, e os outros usos foram considerados como restrições ao problema, sendo totalmente atendidos. No caso da análise multiobjetivo, utilizando o método ELECTRE III, os mesmos oito usuários foram totalmente atendidos, com exceção das restrições de cada uma das alternativas de acordo com a estratégia B. O volume restante foi dividido entre os outros usos, os quais não foram sempre totalmente atendidos como no caso da Programação Dinâmica.

Os comentários a respeito dos resultados da aplicação de cada metodologia estão divididos neste capítulo e, no final, é feita uma análise da coerência e das diferenças entre os dois tipos de abordagem.

### **11.1. COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA**

Nas simulações, com o nível inicial do reservatório igual a 544m, tem-se um déficit de água muito grande, tendo disponível em termos percentuais apenas 10% do total para uma garantia de disponibilidade de 100%, 24% para uma garantia de disponibilidade de 90% e 29% para uma garantia de disponibilidade de 75%. Quando se inicia o período com um nível de 545 metros, tem-se déficit apenas se se quiser uma garantia de disponibilidade de 100%, porém tem-se disponível, nesse caso, 88% da demanda, o que garante o atendimento de quase todos os usuários.

Em todas as quatro simulações, verificou-se que o usuário 5, que corresponde aos irrigantes do Projeto Lagoa Grande com cultura permanente, são primeiramente atendidos. Isto se deve ao fato de que o benefício total por hectare desse usuário é superior aos demais, visto que a

cultura predominante é a banana, que possui o maior valor agregado por hectare dentre os produtos agrícolas. Na seqüência, é atendido o usuário 2, o qual corresponde aos lotes de colonos do Projeto Gorutuba com cultura permanente.

O que se conclui é que a ordem de atendimento depende, de fato, do percentual de área plantada com banana que cada usuário possui. Portanto, os usuários que possuem culturas permanentes são os primeiros a serem atendidos, e estes são ordenados, em última instância, de acordo com o percentual de banana em relação a sua área total.

A configuração das culturas tomada como base para o estudo foi do ano de 1999. Caso haja, futuramente, uma mudança na configuração, pode ser que a alternativa ótima seja alterada.

## **11.2. COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO ELECTRE III**

Primeiramente, é feita uma análise do resultado obtido pela aplicação do conjunto de pesos atribuído aos critérios por cada grupo decisor e para cada nível inicial do reservatório. Em seguida, são analisados os ordenamentos finais das alternativas, para cada nível inicial do reservatório, as quais representam um consenso da opinião de cada grupo decisor. No final, é feita uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos.

### **a) Análise dos resultados considerando o Grupo I e o N.A. = 544m**

A alternativa melhor classificada, nesse caso, foi a XIII, que possui as seguintes estratégias: estratégia A2 – 90% de garantia de disponibilidade e estratégia B3 – atendimento a 100% de US1, US2, US3, US4, US5, US6 e US7 e 70% de US8.

O grupo I é formado pelos representantes dos distritos de irrigação e pelos irrigantes dos projetos públicos. Na opinião desse grupo, a prioridade deve ser o abastecimento dos projetos públicos irrigados, resultando no peso 5 dado ao critério 5, os quais são totalmente atendidos na alternativa escolhida. Porém, além do abastecimento dos projetos, eles têm como segunda prioridade o atendimento da vazão remanescente, conforme pôde ser verificado no peso dado ao critério 4. Portanto, com uma garantia de disponibilidade de 90% e o atendimento de quase

100% dos usos, o volume disponível para ser liberado a jusante aumenta, visto que ele é formado pelo volume dos US5, US6, US7 e US8, pela vazão remanescente, pela retirada irregular e pelo volume destinado à agricultura familiar.

#### **b) Análise dos resultados considerando o Grupo II e o N.A. = 544m**

O grupo II corresponde ao decisor político municipal. A importância dada aos critérios ficou comprometida, visto que só foi possível a coleta da opinião de um prefeito, o que pode não representar de fato a opinião dos representantes de todos os municípios envolvidos na operação da barragem. Mesmo assim, a análise foi feita considerando-se que a opinião pessoal do prefeito entrevistado correspondia à opinião do grupo decisor.

A maior importância também foi dada ao critério 5, o qual recebeu um peso igual a 5. Isso quer dizer que o grupo II se preocupa em garantir o abastecimento de água para os distritos, visto que esses projetos contribuem para o desenvolvimento da região e para o surgimento de indústrias de beneficiamento dos produtos agrícolas.

A alternativa escolhida, nesse caso, foi a mesma escolhida pelo grupo anterior. A diferença é que o critério 4 foi avaliado como não tendo nenhuma importância e sim os critérios 3 e 6. Esses critérios correspondem ao atendimento da agricultura familiar e à garantia de abastecimento de água para usuários a jusante. Como pôde ser visto na avaliação dos resultados do grupo I, a alternativa escolhida favorece um aumento da vazão total liberada a jusante, tanto para o abastecimento da agricultura familiar quanto para fornecimento de água aos usuários localizados a jusante da barragem.

#### **c) Análise dos resultados considerando o Grupo IV e o N.A. = 544m**

A alternativa escolhida por esse grupo foi a XV, a qual corresponde ao agrupamento da estratégia A2 – 90% de garantia de disponibilidade com a estratégia B4 – atendimento a 100% de US1, US2 e US5, 90% de US3, US4, US6 e US7, e 70% de US8.

O grupo IV é formado por representantes de órgãos ambientais. Nesse estudo, também, só foi possível a coleta da opinião de um representante desses órgãos e essa opinião foi considerada a opinião do grupo. O critério mais importante, nesse caso, foi, também, o critério 5,

abastecimento dos projetos públicos irrigados, porém foi dado um peso significativo para o critério 3, que corresponde à minimização do deplecionamento do reservatório, com vistas à melhoria da qualidade ambiental.

A alternativa escolhida diminui a vazão liberada a jusante, visto que atende a somente 90% de US6 e US7 e 70% de US8. Com isso, ocorre uma diminuição do rebaixamento do nível do reservatório, auxiliando no uso recreacional do lago e na depuração de efluentes domésticos e agrícolas afluentes ao lago.

#### **d) Análise dos resultados considerando o Grupo V e o N.A. = 544m**

No caso do grupo V, funcionários da CODEVASF, existem duas alternativas classificadas em primeiro lugar, a XIII e a XV. Pode-se observar que a alternativa XIII foi a escolhida pelos grupos I e II e a alternativa XV foi a escolhida pelo grupo IV.

Portanto, pode-se inferir que como entidade pública responsável atualmente pela gestão da água do reservatório do Bico da Pedra, sua opinião é que deve-se atender a todas as vertentes interessadas na gestão da água, e não apenas aos projetos públicos irrigados.

#### **e) Análise dos resultados considerando o Grupo I e o N.A. = 545m**

No ordenamento final para essa hipótese, foram escolhidas as alternativas VI e X, porém as duas como sendo incomparáveis. A alternativa VI tem a seguinte configuração: estratégia A1 – 100% de garantia de disponibilidade e estratégia B3 – 100% de US1, US2, US3, US4, US5, US6 e US7 e 70% de US8. Essa alternativa em relação à estratégia B3 é igual à alternativa XIII escolhida pelo mesmo grupo no caso do N.A. = 544m, com uma diferença na estratégia A, que se justifica pelo fato de que, com um nível inicial mais alto, há mais disponibilidade de água, permitindo a garantia de disponibilidade de 100%.

A outra alternativa melhor classificada foi a X, a qual possui a seguinte configuração: estratégia A2 – 90% de garantia de disponibilidade e estratégia B1 – atendimento a 100% dos usos. A alternativa X também pode ser a melhor, visto que se se diminuir a garantia de disponibilidade, pode-se atender a todos os usos, onde estão incluídos os distritos (critério 5)

e, também, à totalidade da demanda para outros usos, inclusive a de agricultura familiar (critério 2).

**f) Análise dos resultados considerando o Grupo II e o N.A. = 545m**

As alternativas escolhidas por este grupo foram as VI e X, as mesmas escolhidas pelo grupo I. A variação nos pesos atribuídos aos critérios foi que, no caso do grupo I, o critério com o segundo grau de importância é o critério 4, percentual de atendimento da vazão remanescente, e, no caso do grupo II, são os critérios 2, percentual de atendimento da agricultura familiar, e 6, garantia de abastecimento de água para usuários a jusante. Nos dois casos, os critérios são atendidos pela mesma alternativa, visto que ela aumenta o volume de água total liberado a jusante.

**g) Análise dos resultados considerando o Grupo IV e o N.A. = 545m**

Nesse caso, foram escolhidas cinco alternativas, algumas equivalentes e outras incomparáveis. As alternativas foram IV, VI, VIII, XII e XVI. As alternativas IV e VI garantem o abastecimento de 100% dos projetos públicos irrigados, com 100% de garantia de disponibilidade, estando de acordo com a importância atribuída pelo grupo ao critério 5.

A alternativa VIII abastece a totalidade de US1, US2 e US5, 90% de US3, US4, US6 e US7 e apenas 70% de US8. A escolha dessa alternativa pode ser justificada pelo fato de que os critérios 2, percentual de atendimento da agricultura familiar, 4, percentual de atendimento da vazão remanescente, e 6, garantia de abastecimento de água para usuários a jusante, foram pontuados pelo grupo decisor. Portanto, com essa configuração de atendimento, a vazão total liberada a jusante aumenta, atendendo assim aos critérios 2, 4 e 6.

A escolha das alternativas XII e XVI deve-se, principalmente, ao peso dado ao critério 3, minimização do deplecionamento. Essas alternativas têm garantia de disponibilidade de 90%, fazendo com que haja água disponível para o atendimento a todos os usos. Porém, nessas alternativas, optou-se por guardar água no reservatório, aumentando o nível no final do período e atendendo ao critério 3.

#### **h) Análise dos resultados considerando o Grupo V e o N.A. = 545m**

A alternativa escolhida por esse grupo foi a X, a qual possui a seguinte configuração: estratégia A2 – 90% de garantia de disponibilidade e estratégia B1 – atendimento a 100% dos usos. Portanto, com a garantia de disponibilidade de 90%, pode-se atender a 100% dos usos, o que é o desejo do representantes do grupo V, cujos pesos atribuídos por eles configuram o atendimento a todos os usos concomitantemente.

#### **i) Análise do ordenamento final considerando o N.A. = 544m**

Considerando a matriz resultado como sendo um consenso de todos os grupos decisores, tem-se a escolha das melhores alternativas equivalentes, a XIII e a XV. A alternativa XIII possui as seguintes estratégias: estratégia A2 – 90% de garantia de disponibilidade e estratégia B3 – atendimento a 100% de US1, US2, US3, US4, US5, US6 e US7 e 70% de US8; e a alternativa XV corresponde ao agrupamento da estratégia A2 – 90% de garantia de disponibilidade e da estratégia B4 – atendimento a 100% de US1, US2 e US5, 90% de US3, US4, US6 e US7, e 70% de US8.

A alternativa XIII atende à totalidade da demanda dos projetos públicos irrigados e aumenta a vazão liberada a jusante, atendendo aos interesses dos distritos, do representante da prefeitura municipal e dos funcionários da CODEVASF. A alternativa XV diminui a vazão liberada a jusante, com conseqüente aumento do nível do reservatório no final do período, melhorando as características ambientais. A escolha da melhor alternativa dentre as duas melhores classificadas dependeria, assim, de uma decisão compartilhada por todos os envolvidos no processo de gestão, com o objetivo de decidir se é mais importante atender aos usuários a jusante ou manter as características ambientais do lago.

#### **j) Análise do ordenamento final considerando o N.A. = 545m**

A alternativa escolhida no consenso dos grupos decisores foi a XIV, a qual possui a seguinte configuração: estratégia A2 – 90% de garantia de disponibilidade e estratégia B4 – atendimento de 100% de US1, US2 e US5, 90% de US3, US4, US6 e US7, e 70% de US8.

Com essa configuração, existe água disponível para o atendimento de 100% dos usos, porém preferiu-se armazenar água no reservatório para garantir sua qualidade ambiental e proporcionar o lazer no lago.

### 11.2.1. Análise da sensibilidade dos resultados da aplicação do modelo ELECTRE III

A análise de sensibilidade dos resultados obtidos na simulação multiobjetivo tem o objetivo de avaliar a estabilidade desses resultados quando modificados os valores de algumas variáveis ou quando alterados alguns parâmetros como, por exemplo, o conjunto de pesos de algum critério, os limiares de indiferença, preferência e veto, dentre outros, e também avaliar a influência do grau de incerteza dos valores de cada um destes parâmetros na solução final.

As variações dos parâmetros realizadas neste trabalho encontram-se resumidas na tabela 11.1, a seguir. Os resultados dessas variações são demonstrados posteriormente, com comentários a respeito da sensibilidade da solução encontrada.

Tabela 11.1 – Variações nos parâmetros para análise de sensibilidade

Parâmetros	Variação
Valores dos critérios	Aumento de 10% dos valores dos critérios das alternativas melhor classificadas.
Valores dos limiares	Aumento de 10% dos valores dos limiares de indiferença, preferência e veto.
Valores dos pesos	Diminuição de 1 ponto dos pesos do critério 5, que obteve maior importância atribuída por todos os decisores.

#### a) Variação dos valores dos critérios

A variação dos critérios foi feita nas alternativas XIII, XIV e XV, as quais foram globalmente melhor classificadas. O objetivo era verificar se haveria desempate. A variação resultou na seguinte classificação, conforme tabela 11.2, a seguir.

Tabela 11.2 – Resultados da variação dos valores dos critérios

Classificação	Resultado 544m	Resultado 544m com variação	Resultado 545m	Resultado 545m com variação
1	XIII e XV	XIII	XIV	XIV
2	IX e XI	XV	II e XVI	II e XVI
3	I e XXI	I e XXI	X, XII e IV	VIII, XII e IV
4	V, III e XVII	IX, V, III e XVII	VIII e XXIV	X
5	VII	VII	VI	XXIV
6	XXIII	XXIII	XVIII	VI
7	XIX	XI	XXII	XVIII
8		XIX	XX	XXII
9				XX

Como pode ser observado, não houve variações significativas na classificação das alternativas nos dois casos, para N.A. igual a 544m e para N.A. igual a 545m. No primeiro caso, a alternativa XV que era uma das primeiras colocadas, passou a ser a segunda na classificação. As alternativas menos importantes na classificação mantiveram-se as mesmas, mudando apenas algumas colocações intermediárias.

Com isso, pode-se inferir que os resultados apresentados são pouco sensíveis, no caso, às variações nos valores atribuídos aos critérios.

#### **b) Variação dos valores dos limiares**

A variação dos valores dos limiares foi feita em 10% para mais em todos os casos e para as duas possibilidades, N.A. igual a 544m e a 545m. A tabela 11.3, a seguir, mostra as variações dos resultados finais com a alteração dos limiares.

Tabela 11.3 – Resultado da variação dos valores dos limiares

Classificação	Resultado 544m	Resultado 544m com variação	Resultado 545m	Resultado 545m com variação
1	XIII e XV	XIII	XIV	XIV
2	IX e XI	XV	II e XVI	II e XVI
3	I e XXI	IX e XI	X, XII e IV	X, XII e IV
4	V, III e XVII	I e XXI	VIII e XXIV	VIII e XXIV
5	VII	V, III e XVII	VI	VI
6	XXIII	VII	XVIII	XVIII
7	XIX	XXIII	XXII	XXII
8		XIX	XX	XX

Os resultados decorrentes da variação dos limiares não variaram muito em relação ao resultado final. Considerando o N.A. igual a 544m, houve apenas uma variação na posição da alternativa XV, onde esta passou a ser a segunda colocada. No caso do N.A. igual a 544m o ordenamento das alternativas continuou o mesmo.

Com isso, pode-se inferir que uma pequena variação dos limiares não influencia, no caso, no resultado final.

### c) Variação dos valores dos pesos

Optou-se, nesse caso, por variar em 1 ponto para menos os valores dos pesos atribuídos ao critério 5 por todos os grupos decisores, visto que esse critério foi o que obteve as maiores notas. Com isso, foram obtidas as classificações com alterações no conjunto de pesos, descritas na tabela 11.4.

Tabela 11.4 – Resultado da variação dos valores dos pesos

Classificação	Resultado 544m	Resultado 544m com variação	Resultado 545m	Resultado 545m com variação
1	XIII e XV	III, XI e XIII	XIV	XIV
2	IX e XI	V e XV	II e XVI	XII e II
3	I e XXI	I	X, XII e IV	X e XVI
4	V, III e XVII	IX	VIII e XXIV	VI
5	VII	VII	VI	IV
6	XXIII	XVII e XXIII	XVIII	VIII
7	XIX	XXI	XXII	XVIII
8		XIX	XX	XXII
9				XXIV
10				XX

A variação dos pesos do critério 5 provocou uma troca de posições em ambos os casos, com o N.A. igual a 544m e a 545m. No primeiro caso, a alternativa XIII continuou sendo a melhor colocada, porém a alternativa XV passou a ser a segunda colocada e a alternativa pior colocada continuou sendo a XIX. No segundo caso, a alternativa mais bem colocada na classificação continuou sendo a mesma, havendo alterações nas colocações intermediárias, permanecendo a mesma a alternativa pior colocada.

A conclusão desta análise, variando-se o conjunto de pesos de um determinado critério, mostrou, para o caso, a influencia que o critério 5 exerce no resultado final.

### **11.3. AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A APLICAÇÃO DOS MÉTODOS MONOCRITÉRIO E MULTICRITÉRIO**

Não se pode fazer muitas comparações entre os resultados dos dois tipos de abordagem, a monocritério e a multicritério, visto que eles foram baseados em premissas diferentes, conforme já foi esclarecido.

Porém, algumas semelhanças e diferenças foram verificadas nas soluções encontradas pelos dois métodos, lembrando que as três alternativas escolhidas no método multicritério possuem uma garantia de disponibilidade de 90%.

Avaliando, portanto, o resultado da PD em que foi considerada a garantia de disponibilidade de 90%, verifica-se que a vazão liberada a jusante é muito baixa, principalmente devido ao não atendimento dos usuários US6, US7 e US8. Portanto, o resultado da PD para esta garantia se assemelha ao obtido pela análise multicritério para a alternativa XV, que atende a 100% de US1, US2 e US5, 90% de US3, US4, US6 e US7 e 70% de US8, a qual diminui consideravelmente a vazão liberada a jusante, aumentando o percentual de atendimento dos outros usos, os quais foram considerados como restrições da PD.

A alternativa XIII também diminui a vazão liberada a jusante, aumentando o atendimento dos outros usos.

No caso da alternativa XIV, não há como compará-la com o resultado da PD, visto que ela possui garantia de atendimento de 90% para o N.A. igual a 545m, gerando uma disponibilidade maior do que a demanda, o que não foi simulado na PD.

## 12. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa, foi examinada a utilização de técnicas da programação matemática e da pesquisa operacional na alocação do volume disponível em um reservatório de múltiplos usos. Foi adotado, como hipótese de trabalho, que a decisão de quanto em volume de água seria disponibilizado para cada usuário seria tomada no início do período crítico hidrológico e no âmbito de um comitê de bacia ou comitê de usuário, utilizando técnicas de auxílio à decisão. Isso se contrapõe ao que é feito atualmente na maioria dos reservatórios, em que o volume é disponibilizado primeiramente para usos setoriais e o excedente é dividido entre os usuários restantes, o que não se coaduna com os princípios dos usos múltiplos e da decisão descentralizada e participativa propostos na Lei das Águas do Brasil.

Assumi-se, também, como hipóteses que:

- a aplicação de técnicas de análise monocritério e multicritério na definição de regras operativas de reservatórios seria útil para o balizamento das decisões que seriam tomadas no âmbito do comitê de bacia;
- a utilização especificamente da análise multicritério permitiria a consideração de outros objetivos na operação da barragem, além de um objetivo setorial ou econômico, contribuindo para uma melhoria do processo decisório e da eficiência global do empreendimento.

Com vistas a permitir um entendimento do processo de realização deste trabalho e das conclusões obtidas, este capítulo foi estruturado em quatro itens. No primeiro item, são feitas algumas observações a respeito dos procedimentos metodológicos adotados na pesquisa. O segundo item é dedicado às considerações quanto ao atendimento dos objetivos iniciais do estudo, enquanto que, no terceiro item, são descritas sucintamente as metodologias de auxílio à decisão efetivamente aplicadas no trabalho. No quarto e último item, são analisados os resultados da aplicação das metodologias escolhidas para o caso em questão, a operação da barragem do Bico da Pedra, no rio Gortuba, bacia do rio Verde Grande, em Minas Gerais.

### *Metodologia adotada no estudo*

O trabalho iniciou-se com a pesquisa da bibliografia existente sobre as diferentes metodologias de análise de sistemas aplicáveis a problemas de recursos hídricos. Foram identificadas duas tipologias de análise, a monocritério e a multicritério, que permitem decidir sobre alocação de água em um reservatório. Nesta etapa, foi também desenvolvida uma discussão teórica envolvendo as principais técnicas existentes.

Verificou-se na literatura que, como esperado, os métodos monocritério foram mais aplicados a problemas de alocação de água de reservatórios do que os métodos multicritério. Concluiu-se, assim, pela pertinência em se testar a aplicabilidade de técnicas multicritério a esse tipo de problema, de tal modo a permitir a consideração de critérios ambientais e sociais, tão importantes nesses casos.

Os métodos de análise monocritério estudados mais detalhadamente foram a Programação Linear, a Programação Não-Linear e a Programação Dinâmica, avaliando-se as vantagens e desvantagens na sua aplicação, buscando com isso permitir a escolha de uma técnica mais apropriada para o caso em estudo. No caso da análise multicritério, foram estudados os métodos julgados mais aplicáveis a problemas de recursos hídricos, que foram a Programação de Compromisso, os métodos da série ELECTRE e o Promethee.

O caso escolhido para o teste das técnicas foi a barragem do Bico da Pedra, localizada na bacia do rio Gortuba em Minas Gerais. Essa escolha deveu-se, entre outros fatores, ao fato de já existirem conflitos de operação. O aumento desordenado das áreas irrigadas a jusante da barragem, vem causando escassez de água para alocação aos irrigantes, inclusive originando reclamações dos irrigantes localizados fora dos projetos públicos irrigados à empresa responsável pela operação da barragem, a CODEVASF, para que esta libere mais água para jusante.

Foram levantadas nesta fase as características da bacia do rio Gortuba, da barragem do Bico da Pedra, da área ocupada pela irrigação dentro e fora dos projetos públicos, dentre outras. Foi feita também uma pesquisa do histórico dos conflitos existentes na região e um levantamento das entidades envolvidas no processo de gestão da água.

De posse das características básicas das principais técnicas de auxílio à decisão e do conhecimento do caso a ser estudado, pôde-se fazer a escolha da técnica que seria aplicada. A escolha da Programação Dinâmica deveu-se ao fato de que ela permite a consideração de como as alterações nas variáveis podem influenciar na decisão final, além de trabalhar com variáveis discretas, que foi o caso do trabalho desenvolvido. Para a escolha da técnica de análise multicritério a ser adotada, foi feito um levantamento na literatura relativo à classificação dessas técnicas em classes, de acordo com características de utilização. Com isso, o método ELECTRE III foi escolhido por suas características se adequarem ao problema estudado.

Devido à falta de dados fluviométricos passíveis de serem utilizados na simulação, foi necessária a aplicação de um modelo chuva-vazão para gerar uma série mais longa de dados. O modelo utilizado foi o IPH-MEN e os seus parâmetros foram otimizados utilizando-se os dados observados no período de 1970 a 1973. De posse dos parâmetros e da precipitação média mensal para o período de 1988 a 1999, foi possível a estimativa dos dados de vazão média mensal para o mesmo período. Os dados obtidos na simulação foram testados utilizando-se a equação do balanço hídrico para o reservatório em questão, cujos dados de entrada e saída de água eram disponíveis para o mesmo período.

A bacia escolhida não possuía dados de vazão suficientes para permitir a estimativa precisa da parcela liberada para cada usuário, visto que só foi utilizada uma série de quatro anos de dados e de um período muito antigo. O fato do período com dados ser pouco extenso e muito antigo pode levar a considerar valores da vazão não correspondentes à realidade, pois, além de não se dispor de registro de toda uma variabilidade hidrometeorológica natural, pode ter havido modificações significativas no uso e ocupação do solo na bacia de contribuição, o que influencia o volume escoado. Portanto, recomenda-se para pesquisas futuras, além da realização de correlações e estudos mais elaborados, a comparação, por meio de análise de imagens de satélite, da mudança da cobertura do solo do período com dados com a atual, permitindo o ajuste dos parâmetros para a nova realidade.

A formulação da Programação Dinâmica foi feita levando-se em consideração a existência dos oito usuários de água para irrigação mais representativos na bacia. Os outros usos foram considerados como restrições ao problema e foram completamente atendidos na simulação, como é o caso da vazão remanescente, da agricultura de subsistência, dentre outros. Foram

estimadas, também, as demandas de cada usuário tendo como referência o ano de 1999 e o consumo de água por cultura e por tipologia de usuários, colonos, irrigantes e usuários localizados fora dos projetos públicos irrigados. O critério utilizado na alocação da água foi a maximização de um benefício líquido estimado, gerado com a venda dos produtos agrícolas.

A análise multiobjetivo foi estruturada tendo como premissa o atendimento dos oito usuários determinados anteriormente, com o volume restante atendendo aos outros usos. As alternativas definidas levaram em consideração a combinação de duas decisões (garantia de disponibilidade de água no reservatório no final do período considerado - abril a setembro - e atendimento dos diferentes usos), a partir de 2 hipóteses de volume do reservatório no início do período. Com isso, foi calculado para cada alternativa o volume fornecido para cada usuário levando em consideração esse conjunto de alternativas. Definiu-se, também, o grau de atendimento de cada critério pré-estabelecido, incluindo critérios sociais, ambientais e econômicos. Foram identificados os atores envolvidos no processo decisório, os quais atribuíram pesos aos diversos critérios.

#### *Objeto da pesquisa*

A aplicação de técnicas de suporte à decisão tem sido muito difundida no meio acadêmico. Porém, em termos práticos, elas raramente são utilizadas. As pesquisas desenvolvidas nessa área mostram-se, assim, importantes para difundir a aplicabilidade dos métodos e possibilitar, futuramente, uma maior difusão dessas técnicas.

#### *Metodologia adotada*

A aplicação da PD, ao considerar uma simplificação do problema, facilita a formulação de alternativas e a identificação de uma eventual melhor solução. No entanto, a PD restringiu, na aplicação feita, a alocação da água a apenas aos oito usuários definidos, considerando a satisfação aos outros usuários como restrições do problema, dada a impossibilidade de se quantificarem os ganhos ambientais desses outros usos. A consideração de apenas um critério na análise é um fator limitante da aplicação dessa técnica, principalmente para o caso em questão, em que objetivos de equidade social e de conservação ambiental se mostram importantes.

Incluir o conjunto de critérios como uma função a ser maximizada ou como restrições pode ser limitante para o processo de decisão porque dificulta a avaliação por parte dos decisores, tornando pouco flexível o processo de negociação no âmbito de uma decisão descentralizada, o que se pretende no novo modelo de gestão.

A modelagem multicritério adotada permite maior flexibilidade de análise e julgamento para os decisores pois pode atenuar a ocorrência de situações de conflito e de impasse na decisão, tanto por incorporar critérios de caráter social e ambiental quanto pelo princípio de se identificarem soluções aceitáveis e consensuais em detrimento de soluções “ótimas”. No caso em questão, a modelagem multicritério se mostrou mais adequada para representar a complexidade do processo decisório, uma vez que ela levou em consideração as restrições na condição em que elas de fato se apresentam: elementos envolvidos na decisão, isto é, critérios.

Na análise multicritério adotada, vários fatores do processo de decisão são levados em consideração, com definição de um número importante de variáveis e parâmetros. As técnicas de normalização da avaliação dos critérios e de agregação das avaliações não se mostram, muitas vezes, de fácil entendimento por parte dos decisores. Um dos resultados disso é que, caso não haja um grande esforço por parte do analista em explicar a abordagem, o modelo corre o risco de não ser considerado como transparente e confiável por participantes do processo decisório.

#### *Caso de aplicação*

O caso escolhido para a aplicação das técnicas de análise monocritério e multicritério apresentou a particularidade de apresentar conflitos entre usuários de um mesmo setor, o que não é muito comum na literatura sobre pesquisa operacional.

Outra característica do caso estudado foi a iminente criação do Comitê de Bacia do Rio Verde Grande, do qual o rio Gortuba é afluente, o que faz com que a possibilidade de uma gestão participativa do reservatório não se constitua em uma mera hipótese longínqua, o que torna pertinente o estudo de técnicas de análise multicritério e de Programação Dinâmica para o caso em questão.

A escassez dos dados hidrológicos na bacia foi a principal desvantagem da escolha do caso estudado, tendo em vista que os dados gerados a partir de uma série de vazões de apenas quatro anos não são de todo confiáveis.

Uma limitação do estudo desenvolvido está associada à falta de uma maior discussão sobre os resultados das duas abordagens por parte dos atores locais. Havia intenção, no início do estudo, de se realizar um encontro técnico para se discutir a pertinência dos resultados com os atores locais. No entanto, restrições de prazo e custo fizeram com que a discussão se restringisse a especialistas na área e a decisores na esfera federal.

Mesmo assim sendo, pode-se inferir que os resultados obtidos não comprometeram a pertinência das hipóteses inicialmente formuladas. Certamente, discussões posteriores com atores locais e com um maior número de especialistas poderão permitir uma verificação mais ampla dessas hipóteses.

Algumas sugestões e recomendações podem ser feitas, tendo-se em vista, principalmente, as limitações de tempo e de recursos de um projeto de Mestrado:

- melhorar a análise dos dados primários utilizados na simulação, como a vazão afluente, por meio de estudos mais aprofundados da influência da variabilidade da ocupação do solo na série de vazões geradas;
- ampliar a consulta a representantes dos grupos decisores e com isso diminuir as incertezas na atribuição da importância relativa entre os critérios;
- promover um número maior de análises da sensibilidade do modelo multicritério para uma melhor certificação da robustez da solução encontrada;
- analisar a aplicabilidade de outras técnicas de análise monocritério e multicritério a casos dessa natureza.

No futuro, uma melhoria da gestão estratégica da água de um reservatório deve ser assegurada com a atribuição da decisão da política operativa de reservatórios aos comitês de bacias hidrográficas, o que permitirá que sejam consideradas as opiniões dos diferentes atores interessados naquela água. Como vai ser tomada essa decisão no âmbito do comitê é outra questão a ser analisada. Entende a autora que o uso de técnicas de auxílio à decisão pode constituir-se em alternativa adequada, mas deverá levar ainda um certo tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, L.G.T. e Baltar, A.M. (1997). “Nota técnica sobre a atuação do Banco Mundial no gerenciamento de recursos hídricos no Brasil”. **In:** Muñoz, H.R. (ed.). *Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos*. Secretaria de Recursos Hídricos – SRH, Brasília, Brasil, 58-71.
- 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, 97-161.
- Barbosa, P.S.F. (1997b). “O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros”. *A Água em Revista*, **8(2)**, 42-46.
- Barros, M.T.L.B. (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, 239-272.
- Beale, E.M.L. (1988). *Introduction to Optimization*. John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Borella, J. E. (1994). “Considerações sobre irrigação nacional à luz da legislação”. **In:** Millar, A.A. (ed.). *O Gerenciamento dos Recursos Hídricos e o Mercado de Águas*. Secretaria de Irrigação, Brasília, Brasil.
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Perny, P., Tsoukiàs, A. e Vincke, P. (2000). *Evaluation and decision models: a critical perspective*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, Estados Unidos.
- Braga B.P.F., Marcellini, L., Barros, M.T.L. e Almeida, S.B. (1991). “Análise de decisão multiobjetivo: o caso do vale do rio Doce”. *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ABRH)*. Rio de Janeiro, RJ, 501-510.
- Braga, B.P.F. 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, 361-418.
- Braga, B.P.F. e Barbosa, P.S.F. (2001). “Multiobjective real-time reservoir operation with a network flow algorithm”. *Journal of the American Water Resources Association*. **37(4)**, 837-852.
- CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (1995). *Desenvolvimento Metodológico para Modelo de Gerenciamento ambiental de Bacias Hidrográficas, Estudo de Caso: Bacia do Rio Verde Grande*. CETEC, Minas Gerais, Brasil.
- Chankong, V. e Haimes, Y.Y. (1983). “Multiobjective decision-making: theory and methodology”. *Series in System Science and Engineering*. **8**, North-Holland/Elsevier, Nova Iorque, Estados Unidos.

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, 305-356.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (1991). *Sistema de Gerenciamento dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gorutuba*. Brasília, Brasil.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (2000). *Demonstrativo de desempenho e realizações – período 1977 a 2000*. Montes Claros, Minas Gerais, Brasil.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (2003). Relatório interno.

Cohon, J. L. e Marks, D. H. (1975). “A review and evaluation of multiobjective programming techniques”. *Water Resources Research*. **11(2)**.

Cohon, J. L., Church, R. L. e Sheer, D. P. (1979). “Generating multiobjective trade-offs: an algorithm for bicriterion problems”. *Water Resources Research*. **15(5)**, 1001-1010.

Coimbra, R., Rocha, C.L. e Beekman, G.B. (1999). *Recursos Hídricos, Conceitos-Desafios-Capacitação*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Brasília, Brasil.

Cordeiro Netto, O. M., Parent, E. e Duckstein, L. (1996). “Multicriterion design of long-term water supply in southern France”. *Journal of Water Resources Planning and Management*. **122(6)**, 403-413.

Croley II, T. E. e Rao, K. N. R. (1979). “Multiobjective risks in reservoir operation”. *Water Resources Research*. **15(4)**, 807-814.

Curi, W.F. e Curi, R.C. (1998). “Operação integrada de reservatório, poços e área irrigada via programação linear recursiva”. *Anais do 4º Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste (ABRH)*, Campina Grande, Brasil.

Curi, W.F., Curi, R.C. e Celeste, A.B. (1997). “Alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arcoverde para irrigação via programação não linear”. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ABRH)*, Vol. 2, 167, Vitória, Brasil.

Duckstein, L. e Opricovic, S. (1980). “Multiobjective optimization in river basin development”. *Water Resources Research*. **16(1)**, 14-20.

Fernandes, R.J.A.R., Gobbetti, L.E.C., Ceballos, J.C. e Porto, R.L.L. (1997). “Obtenção de políticas ótimas para a operação do reservatório do Guarapiranga”. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ABRH)*, Vol. 2, Vitória, Brasil.

Garrido, R.J. (1999). “O combate à seca e a gestão dos recursos hídricos no Brasil”. **In:** Freitas, M.A.V. de (ed.). *O Estado das Águas no Brasil*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Brasília, Brasil, 285-318.

Generino, R.C.M. e Cordeiro Netto, O.M. (1999). “Métodos multicritério Electre”. *Texto de Disciplinas do Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília*. Brasília, Brasil.

Gershon, M. e Duckstein, L. (1983). “Multiobjective approaches to river basin planning”. *Journal of Water Resources Planning and Management*. **109(1)**, 13-28.

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 (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. Estados Unidos.

Goumas, M. e Lygerou, V. (2000). “An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects”. *European Journal of Operational Research*. **123(3)**, 606-613.

Hobbs, B.F., Chankong, V. e Hamadeh, W. (1992). “Does choice of multicriteria method matter? An experiment in water resources planning”. *Water resources research*. **28(7)**, 1767-1779.

Houck, M. H. e Datta, B. (1981). “Performance evaluation of a stochastic optimization model of reservoir design and management with explicit reliability criteria”. *Water Resources Research*. **17(4)**, 827-832.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1998). *Geoprocessamento para Projetos Ambientais*. São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Jardim, S.B. (1999). *Aplicabilidade de Algumas Técnicas de Análise Multiobjetivo ao Processo Decisório no Âmbito de Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Rio Grande do Sul, 172p.

Joeres, E. F., Seus, G. J. e Engelmann, H. M. (1981). “The linear decision rule (LDR) reservoir problem with correlated inflows, 1. model development”. *Water Resources Research*. **17(1)**, 18-24.

Karamouz, M. e Houk, M. H. (1982). “Annual and monthly reservoir operation rules generated by deterministic optimization”. *Water Resources Research*. **18(5)**, 1337-1344.

Karamouz, M. e Vasiliadis, H. V. (1992). “Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts”. *Water Resources Research*. **28(5)**, 1221-1232.

Keeney, R. L. e Wood, E. F. (1977). “An illustrative example of the use of multiattribute utility theory for water resource planning”. *Water Resources Research*. **13(4)**, 705-712.

Kelman, J., Stedinger J. R., Cooper L. A., Hsu E., e Yuan S.-Q. (1990). “Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation”. *Water Resources Research*. **26(3)**, 447-54.

Klemes, V. (1977). "Discrete representation of storage for stochastic reservoir optimization". *Water Resources Research*. **13(1)**, 149-158.

Lanna, A.E. (1997). "Análise de sistemas e engenharia de recursos hídricos". In: Porto *et al.* (eds.). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 15-41.

Liang, Q., Johnson, L.E. e Yu, Y-S (1996). "A comparison of methods for multiobjective optimization for reservoir operation". *Water Resources Bulletin*. **32(2)**, 333-340.

Loucks, D. P. e Dorfman, P. (1975). "An evaluation of some linear decision rules in chance constrained models for reservoir planning and operation". *Water Resources Research*. **11(6)**, 777-782.

MacCrimmon, K.R. (1973). "An overview of multiple objective decision making". In: Cochrane, J.L. e Zeleny, M. (eds.). *Multiple Criteria Decision Making*. University of South Carolina press, Columbia, South Carolina, Estados Unidos, 18-44.

Maystre, L. Y., Pictet, J. e Simos, J. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE. Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 323 p.

Méllo, A.V. e Matos, L.N. (1999). "Otimização da operação de um reservatório pela programação dinâmica em um processo de decisão Markoviano". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **4(3)**, 5-15.

Méllo, A.V., Braga, B.P.F. e Rocha, J.C.S. (1997). "Otimização estocástica linear aplicada à operação de reservatórios". *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ABRH)*, Vol. 2, 175, Vitória, Brasil.

MMA – Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (1998). *Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Verde Grande*. Governo dos Estados de Minas Gerais e Bahia, Minas Gerais, Brasil.

Mohan, S. e Raipure, D. M. (1992). "Multiobjective analysis of multireservoir system". *Journal of Water Resources Planning and Management*". **118(4)**, 356-387.

Mohammadi, B. e Mariño, M. A. (1982). "Reservoir operation: choice of objective functions". *Journal of Water Resources Planning and Management*. **110(1)**, 15-29.

Muñoz, H.R. (1997). *Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos*. Secretaria de Recursos Hídricos – SRH, Brasília, Brasil, 13-30.

Nijkamp, P. e Vos, J. B. (1977). "A multicriteria analysis for water resource and land use development". *Water Resources Research*. **13(3)**, 513-518.

Oliveira, J.A. e Lanna A.E.L. (1997). "Otimização de um sistema de múltiplos reservatórios atendendo a múltiplos usos no Nordeste brasileiro". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **4(2)**, 123-142.

- Opricovic, S. e Djordjevic, B. (1976). “Optimal long-term control of multipurpose reservoir with undirect users”. *Water Resources Research*. **12(6)**, 1286-1290.
- Pagnoccheschi, B. (2000). “A Política Nacional de Recursos Hídricos no cenário da integração das políticas públicas”. In: Muñoz, H.R. (ed.). *Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos*. Secretaria de Recursos Hídricos – SRH, Brasília, Brasil, 31-57.
- Palmer, N. e Lund, J. R. (1985). “Multi-objective analysis with subjective information”. *Journal of Water Resources Planning and Management*. **111(4)**, 399-416.
- Pomerol, J-C. e Barba-Romero, S. (2000). *Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, Estados Unidos.
- Raj, P.A. (1995). “Multicriteria methods in river basin planning – a case study”. *Water Science & Technology*. **31(8)**, 261-272.
- Raju, K.S. e Pillai, C.R.S. (1999a). “Multicriterion decision making in performance evaluation of a irrigation system”. *European Journal of Operational Research*. **112(3)**, 479-488.
- Raju, K.S. e Pillai, C.R.S. (1999b). “Multicriterion decision making in river basin planning and development”. *European Journal of Operational Research*. **112(2)**, 249-257.
- Ruralminas (2000). *Sistematização do cadastro de irrigantes e outros usos na bacia do rio Verde Grande*. Diretoria de Gerenciamento de Projetos, Minas Gerais, Brasil, 9p.
- Simonovic, S. P. e Mariño, M. A. (1980). “Reliability programming in reservoir management, 1, single multipurpose reservoir”. *Water Resources Research*. **16(5)**, 840-848.
- Simpson, L. (1996). “Do decision makers know what they prefer? MATV and ELECTRE II”. *Journal of the operational research society*. **47(7)**, 919-929.
- Sinha, A.K., Rao, B.V. e Bischof, C.H. (1999). “Nonlinear optimization model for screening multipurpose reservoir systems”. *Journal of Water Resources Planning and Management*. **125(4)**, 229-233.
- Soncini-Sessa, R., Canuti, D., Colorni, A., Villa, L., Vitali, B. e Weber, E. (2000). “Use of multi-criteria analysis to resolve conflicts in the operation of a transnacional multipurpose water system – the case of Lake Verbano (Italy-Switzerland)”. *Water Internacional*. **25(3)**, 334-346.
- Tauxe, G. W., Inman, R. R. e Mades, D. M. (1979). “Multiobjective dynamic programming with application to a reservoir”. *Water Resources Research*. **15(6)**, 1403-1408.
- Thampapillai, D. J. e Sinden, J. A. (1979). “Trade-offs for multiple objective planning through linear programming”. *Water Resources Research*. **15(5)**, 1028-1034.
- Tucci, C.E.M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Porto Alegre, Brasil.

Vedula, S. e Rogers, P. P. (1981). “Multiobjective analysis of irrigation planning in river basin development”. *Water Resources Research*. **17(5)**, 1304-1310.

Vedula, S. e Mujumdar, P.P. (1992). “Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops”. *Water Resources Research*. **28(1)**, 1-9.

Vincke, P., Gassner, M. e Roy, B. (1992). *Multicriteria Decision-Aid*. John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra, 154p.

WCD - The World Commission of Dams (2000). *Dams and development – a new framework for decision-making*. Londres, Inglaterra.

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.

## REFERENCIAS CITADAS POR OUTROS

Box, G. E. P. e Jenkins, G. M. (1976) *apud* Fernandes *et al.* (1997). *Time Series Analysis Forecasting and Control*. Hoden-Day, São Francisco, 553p.

Churchman, C. W. e Ackoff, R. L. (1954) *apud* Pomerol e Barba-Romero (2000). “An approximate measure of value”. *Journal of the Operational Research Society of America*. **2(2)**, 172-187.

Corlorni, A. e Fronza, G. (1976) *apud* Simonovic e Mariño (1980). “Reservoir management via reliability programing”. *Water Resources Research*. **12(1)**, 85-88.

Dreyfus, S. E. e Law, A. M. (1977) *apud* Yeh (1985). *The Art and Theory of Dynamic Programming*. Academic, Orlando, Flórida.

Geoffrion, A., Dyer, J. e Feinberg, A. (1972) *apud* Vincke *et al.* (1992). “An interactive approach for multi-criterion optimization, with an application to the operation of an academic department”. *Management Science*. **19(4)**, 357-368.

Griffith, R. E. e Stewart, R. A. (1961) *apud* Cirilo (1997). *A nonlinear programming technique for optimization of continuous processing systems*. *Management Sci.*, p. 7-379.

Hall, W. A. (1964) *apud* Opricovic and Djordjevic (1976). “Optimum design of a multiple-purpose reservoir”. *Journal of Hidraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng.* 90.

Jacquet-Lagrèze, E., Meziani, R. E Slowinski, R. (1987) *apud* Vincke *et al.* (1992). “MOLP interactive assessment of a piecewise utility function”. *European Journal of Operational Research*. **31(3)**, 350-357.

- Korhonen, P. E Laakso, J. (1986) *apud* Vincke *et al.* (1992). “A visual interactive method for solving the multicriteria problem”. *European Journal of Operational Research*. **24(2)**, 277-287.
- ReVelle, C., Joeres, E. e Kirby, W. (1969) *apud* Yeh (1985). “The linear decision rule in reservoir management and design, 1, development of the stochastic model”. *Water Resources Research*. **5(4)**, 767-777.
- Roy, B. (1976). *apud* Vincke *et al.* (1992) “From optimization to multicritério decision aid: three main operational attitudes”. *em Multiple Criteria Decision Making*, Thirlez, H. e Zionts, S. (eds), Springer-Verlag 130, 1-32.
- Roy, B. (1985) *apud* Vincke *et al.* (1992). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, Paris.
- Schärlig, A. (1985) *apud* Vincke *et al.* (1992). *Décider sur plusieurs critères*. Collection Diriger l'Entreprise, Press Polytechniques Romandes.
- Steuer, R. E Choo, E. (1983) *apud* Vincke *et al.* (1992). “An interactive weighted Tchebycheff procedures for multiple objective programming.” *Mathematical Programming*. **26**, 326-344.
- Vanderpooten, D. (1988) *apud* Vincke *et al.* (1992). “A multicriteria interactive procedure supporting a directed learning of preferences. *EURO IX Conference*, Paris.
- Vieli, M. (1984) *apud* Pomerol e Barba-Romero (2000). *Une expérience en matière de pondération des critères*. Apresentado no 20<sup>o</sup> journées sur l'aide à la décision multicritère, Paris.
- Vincke, Ph. (1976b) *apud* Vincke *et al.* (1992). “Une méthode interactive en programmation linéaire à plusieurs fonctions économiques”. *Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle*. **2**, 5-20.
- Wallenius, J. (1975) *apud* Goicoechea *et al.* (1982). “Comparative Evaluation of Some Interactive Approaches to Multi-Criterion Optimization”. *Management Science*. **31(12)**.
- Wierzbicki, A. (1980) *apud* Vincke *et al.* (1992). “The use of reference objectives in multiobjective optimization” *em MCDM Theory and Application*, Fandel, G. e Gal, T. (eds), Springer-Verlag 177, 468-486.
- Yu e Roy (1992) *apud* Generino (1999). *ELECTRE TRI. Aspects Méthodologiques et Manuel d'Utilisation*. Document N° 74, version 1.0, Université de Paris Dauphine, Paris, 80p.
- Zhou, J. L. e Tits, A. L. (1992) *apud* Sinha *et al.*, (1999). *User's guide for FSQP, version 3.1*. Sys. Res. Ctr., University of Maryland, College Park, Md.
- Zionts, S. e Wallenius, J. (1976) *apud* Vincke *et al.* (1992). “An interactive programming method for solving the multiple criteria problem.” *Management Science*. **22(6)**, 652-663.

## APÉNDICE

Nome do Proprietário	Área Total do Imóvel (ha)	N	E	Área Implantada (ha)	Área Atualmente Irrigada (ha)	Método de Irrigação	Vazão Captada Irrigação (l/s)
Fidelino Fernandes de Souza	188,00	15°25'53"	43°38'56"	50,00	0,00	Pivô-Central	0,00
Sergio Henrique Mourthê Duarte	40,00	15°57'17"	43°13'11"	5,00	5,00	Aspersão Convencional	3,60
Deustede Vieira de Souza	10,00	16°17'35"	43°15'08"	0,50	0,50	Aspersão Convencional	0,60
José dos Reis Rodrigues	2,00	16°14'04"	43°15'53"	0,50	0,50	Aspersão Convencional	0,60
Antonio Luiz de Sousa	25,00	16°13'09"	43°16'02"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	2,40
Vailder Alves da Cruz	0,00	16°13'06"	43°16'04"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
José Geraldo dos Santos (Parente)	0,00	16°12'14"	43°16'13"	4,50	4,50	Aspersão Convencional	5,40
Mário Jorge Andrade	160,00	16°12'03"	43°16'01"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
Deícola Pereira Coelho	203,28	16°06'06"	43°16'10"	5,00	5,00	Aspersão Convencional	6,00
Joaquim Cardoso Vieira	33,70	16°00'52"	43°13'19"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	2,40
Amáro de Paula Viana Júnior	73,00	15°59'57"	43°13'04"	7,00	7,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	5,60
Amáro de Paula Viana Júnior	73,00	15°59'57"	43°13'04"	4,00	4,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	3,20
Isidoro José Francisco	480,00	15°59'19"	43°13'05"	3,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
José Vicente Soares	130,00	15°58'38"	43°13'06"	8,00	8,00	Aspersão Convencional	9,60
CODEVASF	10,00	15°58'22"	43°13'11"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
Arlindo Nunes da Silva	0,00	15°58'09"	43°13'11"	3,00	3,00	Aspersão Convencional	6,00
CODEVASF	0,00	15°58'06"	43°13'17"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	2,00
CODEVASF	72,00	15°58'00"	43°13'11"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	2,40
Alberto Carvalho	223,00	15°57'49"	43°13'27"	2,50	2,50	Aspersão Convencional	3,00
CODEVASF	0,00	15°57'04"	43°12'50"	3,50	3,50	Aspersão Convencional	5,00
CODEVASF	0,00	15°56'52"	43°13'11"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	3,60
CODEVASF	0,00	15°56'44"	43°13'19"	1,50	1,00	Aspersão Convencional	2,50
Pacífico Mendes Farias	1,00	15°56'04"	43°11'13"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20

Nome do Proprietário	Área Total do Imóvel (ha)	N	E	Área Implantada (ha)	Área Atualmente Irrigada (ha)	Método de Irrigação	Vazão Captada Irrigação (l/s)
Joaquim Mendes de Souza	150,00	15°56'27"	43°11'21"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	5,00
CODEVASF	110,00	15°56'32"	43°12'46"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	1,80
CODEVASF	110,00	15°56'32"	43°12'46"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
CODEVASF	0,00	15°56'15"	43°13'31"	1,50	1,50	Pivô-Central	1,65
CODEVASF	70,00	15°56'08"	43°13'35"	4,00	4,00	Aspersão Convencional	4,80
CODEVASF	38,70	15°55'22"	43°11'55"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	2,40
CODEVASF	8,00	15°55'23"	43°13'14"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	5,00
Bejamim Martins de Souza	17,00	15°55'05"	43°13'19"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	1,80
José Mauricio Ruas de Abreu	127,00	15°54'57"	43°12'41"	19,00	14,00	Aspersão Convencional	16,80
José Mauricio Ruas de Abreu	127,00	15°54'57"	43°12'41"	5,00	5,00	Aspersão Convencional	6,00
Atenor Soares	120,00	15°53'38"	43°14'12"	4,00	1,50	Aspersão Convencional	1,80
CODEVASF	0,00	15°53'27"	43°13'36"	2,00	2,00	Superfície Inundação	4,00
CODEVASF	12,00	15°53'27"	43°13'36"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	2,40
Eubert Veloso Mendes	13,00	15°53'03"	43°16'40"	0,30	0,30	Gotejamento	3,00
João Oliveira dos Santos	1,00	15°52'46"	43°12'37"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	
Eduardo Cardoso do Rêgo	0,30	15°52'22"	43°12'45"	0,20	0,20	Mangueira	0,50
Iate Clube Bico da Pedra	0,00	15°52'14"	43°13'02"	0,50	0,50	Mangueira	8,30
Danúbio Udson C. Santos	12,66	15°51'41"	43°13'27"	0,50	0,50	Aspersão Convencional	3,30
GGL Empreendimentos de Hortelaria e Tur.	43,00	15°51'41"	43°13'36"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	4,00
Eustáquio de Fátima Guimarães	20,70	15°51'32"	43°13'44"	12,00	12,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	10,80
Wallace Geraldo de Almeida	2,80	15°51'16"	43°13'53"	0,50	0,50	Mangueira	5,50
Brasilino Mendes	81,00	15°50'52"	43°14'01"	3,50	3,50	Aspersão Convencional	4,20

Nome do Proprietário	Área Total do Imóvel (ha)	N	E	Área Implantada (ha)	Área Atualmente Irrigada (ha)	Método de Irrigação	Vazão Captada Irrigação (l/s)
Brasilino Mendes	16,00	15°50'52"	43°14'05"	0,50	0,50	Aspersão Convencional	0,60
José Reinaldo Barbosa	42,00	15°50'43"	43°14'10"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	2,50
Edgar Alves Pereira	0,60	15°50'03"	43°14'01"	0,50	0,50	Gotejamento	2,00
Juares Carlos Dias Oliveira	11,00	15°49'55"	43°14'10"	0,50	0,50	Mangueira	0,50
Gilberto Teixeira Alves	137,00	15°49'36"	43°14'05"	6,00	6,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	5,40
Gilberto Teixeira Alves	137,00	15°49'36"	43°14'05"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
Nivaldo Antunes de Souza	0,90	15°49'31"	43°14'18"	2,00	2,00	Gotejamento	0,20
Rômulo Parrela	0,00	15°49'34"	43°15'41"	0,30	0,30	Aspersão Convencional	0,50
Amideus Pereira Santos	8,00	15°49'37"	43°15'44"	0,30	0,30	Gotejamento	0,30
Associação Educacional da Pedra Bruta	14,00	15°49'37"	43°16'32"	2,70	2,70	Aspersão Convencional	3,24
Associação Educacional da Pedra Bruta	0,00	15°49'37"	43°16'32"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
Edson Cardoso de Oliveira	4,00	15°49'47"	43°16'52"	4,00	4,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	3,90
João da Silva Medeiros	2,00	15°49'47"	43°17'03"	2,00	2,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	1,60
Isaias de Sousa Sá Filho	5,00	15°49'47"	43°17'03"	5,00	5,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	4,00
João Pereira dos Santos	25,00	15°49'47"	43°17'10"	4,80	4,80	Micro-Aspersão/Sub-Copa	3,85
William Oliveira	5,00	15°49'47"	43°17'16"	4,00	4,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	3,20
William Oliveira	5,00	15°49'47"	43°17'16"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
Caiçara Praia Clube	8,00	15°49'17"	43°17'26"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	1,80
José Carlos Mendes	10,00	15°47'17"	43°18'32"	10,00	10,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	11,11
José Pereira Filho	6,60	15°47'41"	43°18'57"	5,50	5,50	Aspersão Convencional	7,00
José Carlos Mendes	123,00	15°47'07"	43°18'48"	10,00	10,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	8,00
José Batista Neto	180,00	15°46'42"	43°18'52"	3,00	3,00	Aspersão Convencional	3,60
Geraldo Marques Gomes Lima	120,00	15°45'50"	43°18'38"	4,00	4,00	Superfície Inundação	8,00

Nome do Proprietário	Área Total do Imóvel (ha)	N	E	Área Implantada (ha)	Área Atualmente Irrigada (ha)	Método de Irrigação	Vazão Captada Irrigação (l/s)
Antônio Rodrigues Gomes	35,00	15°46'25"	43°18'46"	20,00	20,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	18,00
José Foch Silveira	47,00	15°46'15"	43°18'47"	6,75	6,75	Micro-Aspersão/Sub-Copa	8,80
José Foch Silveira	47,00	15°46'15"	43°18'47"	4,00	4,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	5,30
Antônio Rodrigues Siqueira	2,50	15°46'15"	43°18'47"	2,00	2,00	Superfície Sulcos	3,00
Aelson Correia dos Santos e outros	4,00	15°46'10"	43°18'40"	2,50	2,50	Aspersão Convencional	3,00
Sementes Agrocere S.A	33,00	15°45'49"	43°17'28"	30,00	30,00	Superfície Sulcos	31,50
Peter Alex Honzák	44,72	15°45'30"	43°18'25"	6,00	6,00	Superfície Inundação	18,06
Roberto Luiz Costa dos Santos	39,00	15°45'26"	43°18'21"	24,00	24,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	19,20
Santo Batista de Souza	52,00	15°45'13"	43°18'34"	18,00	18,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	16,20
Prefeitura Municipal de Janaúba	8,00	15°45'07"	43°18'42"	5,00	5,00	Aspersão Convencional	6,00
Jorge Kakida	100,00	15°45'07"	43°18'42"	23,00	23,00	Aspersão Convencional	27,60
Moisés Santos Oliveira	50,30	15°45'04"	43°18'37"	8,00	8,00	Aspersão Convencional	9,60
Maria do Espirito Santo	8,00	15°45'01"	43°18'40"	3,00	3,00	Aspersão Convencional	3,60
Maria do Espirito Santos	8,00	15°45'01"	43°18'40"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	1,80
Maria do Espirito Santo	8,00	15°45'01"	43°18'40"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	1,80
Marcelino da Costa Medeiros	17,00	15°44'58"	43°18'35"	6,00	6,00	Aspersão Convencional	12,00
Marcelino da Costa Medeiros	17,00	15°44'58"	43°18'35"	6,00	6,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	7,20
Yugi Yamada	20,00	15°44'52"	43°18'27"	18,00	18,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	16,20
Anacleto Maria de Jesus	19,36	15°44'40"	43°18'27"	4,00	4,00	Aspersão Convencional	4,80
João Ferreira Neto	11,00	15°44'25"	43°18'22"	7,50	7,50	Aspersão Convencional	9,00
Fernando Pino Yoca	15,90	15°44'14"	43°17'50"	8,00	8,00	Superfície Sulcos	12,00
Domero Nasar de Oliveira	30,00	15°44'10"	43°17'50"	20,00	20,00	Superfície Sulcos	30,00
Domero Nasar de Oliveira	50,00	15°44'10"	43°17'50"	10,00	10,00	Superfície Sulcos	15,00

Nome do Proprietário	Área Total do Imóvel (ha)	N	E	Área Implantada (ha)	Área Atualmente Irrigada (ha)	Método de Irrigação	Vazão Captada Irrigação (l/s)
Espolio de Cipricio Ferreira da Silva	6,00	15°44'05"	43°17'50"	3,00	3,00	Aspersão Convencional	3,60
Domero Nasár de Oliveira	18,00	15°44'05"	43°17'50"	15,00	15,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	13,50
Almerindo Moreira de Andrade	16,00	15°43'36"	43°17'40"	16,00	16,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	20,00
Dilio Coelho	15,00	15°43'36"	43°18'02"	12,00	12,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	10,80
Alan Ferreira Araújo	42,25	15°43'36"	43°18'02"	38,00	38,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	21,70
Domero Nasar de Oliveira	30,00	15°43'01"	43°17'44"	15,00	15,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	5,00
José Custodio Mendes	54,00	15°42'03"	43°18'24"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	2,40
CODEVASF	48,00	15°41'29"	43°17'57"	10,00	10,00	Aspersão Convencional	12,00
Antonino Pedro Barbosa	15,00	15°41'05"	43°17'54"	6,00	3,00	Superfície Sulcos	9,00
Geraldo Marques Gomes Lima	120,00	15°45'00"	43°18'38"	2,00	2,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	1,60
Delio Drumont	43,00	15°40'43"	43°18'04"	5,00	5,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	4,00
Diogo Bethonico	3.400,00	15°40'26"	43°18'00"	58,00	58,00	Auto-Propelido	75,40
Diogo Bethonico	3.400,00	15°40'26"	43°18'00"	92,00	92,00	Superfície Sulcos	138,00
Shyzuma Kanemoto	105,00	15°40'24"	43°18'47"	22,00	22,00	Superfície Sulcos	33,00
Luiz Marques da Silva	48,00	15°40'06"	43°18'05"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	2,40
Milton Araújo	321,00	15°39'53"	43°18'01"	100,00	100,00	Aspersão Convencional	120,00
Milton Araújo	321,00	15°39'53"	43°18'01"	41,00	41,00	Aspersão Convencional	49,20
Onorio Bispo de Oliveira	8,50	15°39'42"	43°17'50"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
Ronildo Brito Oliveira	19,00	15°39'29"	43°17'46"	9,50	9,50	Micro-Aspersão/Sub-Copa	11,40
Paulo Brito Madureira	41,00	15°39'29"	43°17'46"	3,50	3,50	Aspersão Convencional	4,20
Manoel Batista de Oliveita	58,00	15°39'20"	43°17'46"	3,00	3,00	Aspersão Convencional	3,60
Alecio José dos Santos	8,70	15°39'20"	43°17'47"	5,00	5,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	4,80

Nome do Proprietário	Área Total do Imóvel (ha)	N	E	Área Implantada (ha)	Área Atualmente Irrigada (ha)	Método de Irrigação	Vazão Captada Irrigação (l/s)
Antônio Guimarães Correia	0,00	15°39'10"	43°17'47"	2,00	2,00	Superfície Sulcos	3,00
Carmem Ferreira da Silva	16,00	15°39'14"	43°17'57"	1,50	1,50	Aspersão Convencional	1,80
José Domingos Duarte	33,00	15°39'09"	43°18'00"	2,00	2,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	1,80
Eusébio Borges Pereira	250,00	15°39'01"	43°17'57"	2,50	2,50	Micro-Aspersão/Sub-Copa	2,25
Valdemar Martins da Silva	250,00	15°39'01"	43°17'57"	5,50	5,50	Aspersão Convencional	6,60
Aderlson de Souza Daniel	25,00	15°38'51"	43°17'40"	25,00	25,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	13,80
Antônio Guimarães Correia	150,00	15°38'51"	43°17'40"	12,00	12,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	25,00
Getulio Martins da Silva	1,00	15°38'47"	43°17'40"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
José Oliveira	15,00	15°38'41"	43°17'30"	12,00	12,00	Superfície Sulcos	18,00
Nascimento Martins da Silva		15°38'38"	43°17'29"	1,50	1,50	Superfície Sulcos	2,25
Braulinio Marimho Borges Pereira	5,50	15°38'28"	43°17'33"	1,50	1,50	Superfície Sulcos	2,25
Pedro Gonçalves de Almeida	11,70	15°38'21"	43°17'29"	5,00	5,00	Aspersão Convencional	6,00
Carlito Rodrigues de Jesus	84,00	15°38'18"	43°17'30"	28,00	18,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	25,20
Getúlio Martins da Silva	253,00	15°38'18"	43°17'30"	8,00	8,00	Aspersão Convencional	9,60
Espolio Julião Mendes Ferreira	200,00	15°38'10"	43°17'19"	3,00	3,00	Aspersão Convencional	3,60
Yugi Yamada	255,00	15°38'08"	43°17'19"	150,00	150,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	63,00
Vilson Maximiliano da Cruz	73,21	15°38'02"	43°17'23"	15,00	15,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	13,50
Antônio Fialho dos Santos	10,00	15°37'57"	43°17'23"	5,00	5,00	Superfície Sulcos	7,50
Shizuma Kanemoto	105,00	15°37'55"	43°17'19"	22,00	22,00	Superfície Sulcos	33,00
Shyzuma Kanemoto	105,00	15°37'55"	43°17'19"	22,00	22,00	Superfície Sulcos	33,00
José Alberto Alves de Souza	11,00	15°37'51"	43°17'19"	9,00	9,00	Superfície Sulcos	13,50
José Alberto Alves de Souza	8,00	15°37'51"	43°17'19"	8,00	8,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	6,40
José Antônio Ferreira	9,00	15°37'38"	43°17'06"	5,00	5,00	Superfície Sulcos	7,50

Nome do Proprietário	Área Total do Imóvel (ha)	N	E	Área Implantada (ha)	Área Atualmente Irrigada (ha)	Método de Irrigação	Vazão Captada Irrigação (l/s)
Samuel Gileno de Oliveira	11,00	15°37'32"	43°17'03"	11,00	11,00	Superfície Sulcos	16,50
Espolio de Julião Mendes Ferreira	100,00	15°38'13"	43°17'28"	6,00	6,00	Aspersão Convencional	7,20
Samuel Gileno de Oliveira	11,00	15°37'32"	43°17'03"	11,00	11,00	Superfície Sulcos	16,50
Wadson Flankey Veras Santana	6,80	15°49'47"	43°10'59"	5,00	5,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	4,00
Ineida Maria Otaviano Gatinho	7,80	15°38'31"	43°16'16"	7,00	7,00	Superfície Sulcos	10,50
José Romão Batista	285,00	15°35'28"	43°16'27"	10,00	10,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	9,00
José Romão Batista	285,00	15°35'28"	43°16'35"	18,00	18,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	16,20
Nuno Monteiro Cassasanta	80,00	15°35'24"	43°16'27"	30,00	30,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	27,00
Nuno Monteiro Cassasanta	80,00	15°35'24"	43°16'27"	30,00	30,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	27,00
João Barbosa de Sales	45,00	15°35'04"	43°16'27"	2,50	2,50	Aspersão Convencional	3,00
Pedro Rocha Meira	78,00	15°34'50"	43°16'24"	28,00	28,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	25,20
Clemente Fernandes de Oliveira	266,00	15°34'45"	43°16'56"	10,00	10,00	Aspersão Convencional	12,00
Alberto Marques Matos	120,00	15°33'23"	43°17'46"	11,00	11,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	9,90
Alberto Marques Matos	65,00	15°33'23"	43°17'46"	1,00	1,00	Aspersão Convencional	1,20
Valdir Nunes da Silva	1.375,00	15°32'07"	43°17'19"	15,00	15,00	Aspersão Convencional	18,00
Valdir Nunes da Silva	1.375,00	15°32'07"	43°17'19"	50,00	50,00	Pivô-Central	55,00
Espolio Joaquim Mauricio Azevedo Bahia	630,00	15°31'51"	43°17'24"	150,00	150,00	Superfície Inundação	300,00
Espolio Joaquim Mauricio Azevedo Bahia	630,00	15°31'51"	43°17'24"	20,00	20,00	Aspersão Convencional	24,00
Espolio Alberto França Bahia		15°30'59"	43°16'46"	50,00	50,00	Superfície Inundação	100,00
Espolio de Edilson Brandão Guimarães	500,00	15°28'18"	43°15'38"	11,00	11,00	Aspersão Convencional	13,20
Manoel Cláudio Moreira	248,00	15°27'05"	43°16'24"	0,50	0,50	Aspersão Convencional	0,60
Manoel Cláudio Moreira	248,00	15°27'05"	43°16'24"	30,00	30,00	Aspersão Convencional	36,00
Gentil Antunes de Souza	2.420,00	15°25'05"	43°16'24"	75,00	75,00	Pivô-Central	82,50

Nome do Proprietário	Área Total do Imóvel (ha)	N	E	Área Implantada (ha)	Área Atualmente Irrigada (ha)	Método de Irrigação	Vazão Captada Irrigação (l/s)
Gentil Antunes de Souza	2.420,00	15°24'05"	43°17'18"	45,00	45,00	Pivô-Central	49,50
Delber Clardson Antunes	81,79	15°23'17"	43°17'16"	50,00	50,00	Pivô-Central	55,00
Apolinário Rodrigues	16,00	15°23'02"	43°17'28"	2,00	2,00	Auto-Propelido	2,60
Ambrosio Marques da Silva	100,00	15°22'38"	43°17'46"	3,00	3,00	Aspersão Convencional	3,60
Leonardo Gonçalves Moreira	95,00	15°22'21"	43°17'49"	30,00	30,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	27,00
Virgílio Rodrigues Filho	450,00	15°17'37"	43°18'40"	1,25	1,25	Aspersão Convencional	1,50
Sidney José Nogueira	55,00	15°16'24"	43°19'35"	2,00	2,00	Aspersão Convencional	2,40
Torquatro Fernandes de Souza	145,20	15°16'18"	43°19'26"	3,00	3,00	Aspersão Convencional	3,60
Gabriel Donato de Andrade	3.600,00	15°15'52"	43°19'16"	55,00	55,00	Superfície Inundação	110,00
Gabriel Donato de Andrade	3.600,00	15°15'52"	43°19'16"	55,00	55,00	Superfície Inundação	110,00
Mario Miguel da Silva	18,00	15°15'29"	43°19'29"	4,00	4,00	Aspersão Convencional	4,80
Dirceu Mendes Cordeiro	80,00	15°42'21"	43°18'20"	12,67	12,67	Aspersão Convencional	15,00
Divaldo Cândido dos Santos	600,00	14°59'56"	43°30'34"	4,00	4,00	Aspersão Convencional	4,80
Antonio Bernaros de Souza	500,00	14°59'47"	43°30'25"	6,00	6,00	Micro-Aspersão/Sub-Copa	5,40