



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CAMPUS II - CAMPINA GRANDE**

**ESTIMATIVA DA RECEITA LÍQUIDA E EMPREGOS COM USO DA ÁGUA  
OTIMIZADO DE UM RESERVATÓRIO NO SEMI ÁRIDO PARAIBANO**

**MÁRCIA ARAÚJO DE ALMEIDA**

**CAMPINA GRANDE**

**MAIO - 2001**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

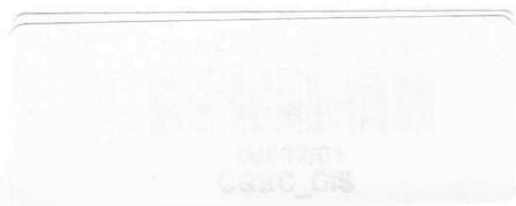
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTIMATIVA DA RECEITA LÍQUIDA E EMPREGOS COM USO DA ÁGUA  
OTIMIZADO DE UM RESERVATÓRIO NO SEMI ÁRIDO PARAIBANO**

**MÁRCIA ARAÚJO DE ALMEIDA**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**MAIO - 2001**



**MÁRCIA ARAÚJO DE ALMEIDA**

**ESTIMATIVA DA RECEITA LÍQUIDA E EMPREGOS COM USO DA ÁGUA  
OTIMIZADO DE UM RESERVATÓRIO NO SEMI ÁRIDO PARAIBANO**

**Dissertação apresentada ao curso de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, na área de  
Engenharia de Recursos Hídricos, em  
cumprimento às exigências para obtenção  
do Grau de Mestre**

**Orientadores: ROSIRES CATÃO CURI  
WILSON FADLO CURI**

**Campina Grande, PB  
MAIO - 2001**



A447e Almeida, Márcia Araújo de.  
Estimativa da receita líquida e empregos com uso da água otimizado de um reservatório no semi árido paraibano / Márcia Araújo de Almeida. - Campina Grande, 2001.  
117 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2001.  
"Orientação : Profa. Dra. Rosires Catão Curi, Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi".  
Referências.

1. Reservatório de Água - Paraíba. 2. Culturas Irrigadas. 3. Perímetro Irrigado de Condado (PB) - Receita Líquida. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Curi, Rosires Catão. II. Curi, Wilson Fadlo. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 628.13(813.3)(043)



**MÁRCIA ARAÚJO DE ALMEIDA**

**ESTIMATIVA DA RECEITA LÍQUIDA E EMPREGOS COM USO DA ÁGUA  
OTIMIZADO DE UM RESERVATÓRIO NO SEMI ÁRIDO PARAÍBANO**

Dissertação aprovada em 29 de maio de 2001

**COMISSÃO EXAMINADORA**



**PhD. ROSIRES CATÃO CURI**

**Orientadora**



**PhD. WILSON FADLO CURI**

**Orientador**



**DR<sup>a</sup>. MÁRCIA MARIA RIOS RIBEIRO**

**Examinadora**



**DR. MANOEL F. GOMES FILHO**

**Examinador**

**Com carinho, a meus pais Inácio e Teresa  
e irmãos Armando e Linaldo,  
DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e conquistas realizadas em vida.

Um OBRIGADO especial a meus pais e irmãos por todo o incentivo e apoio ao longo da minha vida.

Aos orientadores Rosires Catão Curi e Wilson Fadlo Curi, pela orientação e incentivo constante e pela boa convivência proporcionada ao longo da realização deste trabalho.

A todos os professores da Área de Recursos Hídricos pelos ensinamentos e empenho em proporcionar uma boa formação aos alunos deste mestrado.

Aos funcionários do laboratório de Hidráulica, pelos serviços prestados, respeito e atenção dispensados.

A CAPES, pelo apoio financeiro durante a vigência do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Agradeço as minhas colegas Ana Cláudia, Andréa, Cybelle, Dayse, Juliana e Alessandra e todos os demais com os quais eu tive a oportunidade de conviver.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste curso de mestrado.

## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	v
Lista de Tabelas .....	vii
Lista de Símbolos .....	x
Resumo .....	xiv
Abstract .....	xvi
<b>CAPÍTULO I</b>	
1.1 <i>Introdução</i> .....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivos Gerais .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	5
<b>CAPÍTULO II</b>	
2.1 <i>Revisão Bibliográfica</i> .....	8
<b>CAPÍTULO III</b>	
<i>Características e Dados Hidroclimáticos do Sistema em Estudo</i>	
3.1 <i>Introdução</i> .....	14
3.2 <i>Características do Sistema</i> .....	15
3.2.1 - Aspectos Fisiográficos .....	15
3.2.2 - Climatologia .....	17
3.2.3 - O Reservatório Engenheiro Arcoverde .....	19
3.2.4 - Perímetro de Irrigação de Condado .....	21
3.2.5 - O Aquífero Aluvial de Condado .....	23
3.3 <i>Dados Hidroclimáticos do Sistema em Estudo</i> .....	24
3.3.1 - Pluviometria .....	24
3.3.2 - Fluviometria .....	26
3.3.2.1 - O Modelo Tank Model .....	27
3.3.3 - Evaporação .....	28
3.3.4 - Volume Defluente .....	29
3.3.5 - Balanço Hídrico no Reservatório .....	29
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<i>O Modelo de Programação Linear</i>	
4.1 <i>Introdução</i> .....	33
4.2 <i>Funções Objetivo</i> .....	35
4.2.1 - Maximização da Receita Líquida .....	35
4.2.2 - Maximização da mão de obra .....	42
4.3 <i>Equações de Restrições do Modelo</i> .....	43
4.4 <i>Dados de Entrada do Modelo</i> .....	48
4.5 <i>Resultados Fornecidos pelo Modelo</i> .....	51
<b>CAPÍTULO V</b>	
<i>Descrição dos Cenários e Análise dos Resultados</i>	
5.1 <i>Descrição dos Cenários</i> .....	53
5.2 <i>Análise dos Resultados</i> .....	69
5.2.1 - Análise dos Cenários C1 .....	69
5.2.2 - Análise do Cenário C2 .....	71
5.2.3 - Análise do Cenário C3 .....	75
5.2.4 - Análise do Cenário C4 .....	77
5.2.5 - Análise do Cenário C5 .....	79



5.2.6 - Análise do Cenário C6 .....	81
5.2.7 - Análise do Cenário C7 .....	88
5.2.8 - Análise do Cenário C8 .....	89
5.2.9 - Análise do Cenário C9 .....	95
5.2.10 - Análise do Cenário C10 .....	98
5.2.11 - Análise do Cenário C11 .....	100
5.2.12 - Análise do Cenário C12 .....	103
5.2.13 - Análise do Cenário C13.....	107
<b>CAPÍTULO VI</b>	
<i>Conclusões e Recomendações</i>	
6.1 – Conclusões .....	109
6.2- Recomendações .....	111
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>113</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	– Bacias do Estado da Paraíba .....	15
Figura 3.2	– Categorias de Solo de Bacia Hidrográfica do Açude Engenheiro Arcoverde .....	16
Figura 3.3	– Açude Engenheiro Arcoverde.....	19
Figura 3.4	– Layout do sistema em estudo.....	20
Figura 3.5	– Bacia Hidrográfica de drenagem do açude Engenheiro Arcoverde.....	20
Figura 3.6	– Canais de irrigação e poços amazonas do Perímetro de Condado.....	22
Figura 3.7	– Curva de Dupla Massa anual da pluviometria do posto de Condado em relação a média anual dos postos pluviométricos da região .....	26
Figura 3.8	– Esquema para representação da estrutura do modelo Tank Model.....	28
Figura 3.9	– Curva Cota x Área do espelho liquido do reservatório Eng. Arcoverde.....	30
Figura 3.10	– Volume observado e volume calculado do reservatório Eng. Arcoverde ao longo de período de janeiro de 1974 a dezembro de 1980.....	32
Figura 3.11	– Curva Cota x Volume do reservatório Eng. Arcoverde .....	32
Figura 4.1	– Fluxograma do Modelo CISDERGO.....	52
Figura 5.1	– Gráfico dos volumes retirados do reservatório para a irrigação quando feito uso da água do reservatório e poços.....	74
Figura 5.2	– Gráfico dos volumes retirados do reservatório para a irrigação, fazendo-se uso apenas do reservatório.....	74
Figura 5.3	– Gráficos dos volumes extraídos do reservatório para a irrigação .....	80
Figura 5.4	– Gráfico dos volumes retirados dos poços para a irrigação .....	81
Figura 5.5a	– Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclos seco de 1 ano .....	86
Figura 5.5b	– Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclos seco de 2 anos.....	86
Figura 5.5c	– Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclos seco de 3 anos.....	86
Figura 5.5d	– Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclos seco de 4 anos.....	87

Figura 5.5e – Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclo seco de 5 anos .....	87
Figura 5.6 – Volumes de água retirados do reservatório obtidos da otimização com o novo plano cultural, fazendo-se uso do reservatório e poços e com 20hs de bombeamento .....	92
Figura 5.7 – Gráfico dos volumes retirados dos poços para a irrigação com o novo plano cultural, quando feito uso apenas da água dos poços .....	94
Figura 5.8 – Volume inicial ideal para a operação do reservatório – ano médio .....	101
Figura 5.9 – Volume inicial ideal para a operação do reservatório – ano seco, sem critério de sustentabilidade hídrica .....	102
Figura 5.10 – Volume inicial ideal para a operação do reservatório – ano chuvoso .....	103
figura 5.11 – Gráfico dos volumes retirados do reservatório para diferentes situações em relação a variações nos sistemas de irrigação usados .....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Umidade relativa do ar (%) do Posto de Patos.....	17
Tabela 3.2 - Relação dos postos pluviométricos utilizados no estudo.....	25
Tabela 3.3 - Precipitação média mensal homogeneizada da bacia hidrográfica .....	25
Tabela 3.4 - Lâminas mensais afluentes ao reservatório, simuladas, em milímetro, pelo modelo Tank Model .....	27
Tabela 3.5 - Evaporação observada corrigida (mm) em tanque Classe A na estação de Patos .....	29
Tabela 3.6 - Volume mensal observado no Reservatório para o período de 1974-1980 em m <sup>3</sup> .....	31
Tabela 5.1 - Cenários das simulações realizados.....	57
Tabela 5.2 - Valores médios de Precipitação e Vazão afluente ao reservatório Engenheiro Arcoverde (ciclo médio).....	58
Tabela 5.3 - Valores mensais de precipitação e vazão afluentes ao reservatório que caracteriza o ano seco (1983).....	59
Tabela 5.4 - Valores mensais de precipitação e vazão afluentes ao reservatório que caracteriza o ano chuvoso (1985).....	59
Tabela 5.5 - Dados de Evaporação em mm .....	59
Tabela 5.6 - Características do Sistema de Bombeamento.....	61
Tabela 5.7 - Culturas e áreas máximas plantadas por culturas em ha.....	62
Tabela 5.8 - Plano cultural anual.....	62
Tabela 5.9 - Coeficiente de cultivo das culturas.....	63
Tabela 5.10 - Produção das culturas em Kg/ha para o período considerado.....	63
Tabela 5.11 - Custo para produção de cada cultura em R\$/ha para o período considerado.....	63
Tabela 5.12 - Preço médio unitário da cultura (R\$/Kg).....	64
Tabela 5.13 - Mão de obra requerida por cultura/ha/ano .....	64
Tabela 5.14 - Sistema de irrigação para as culturas, suas eficiências e pressões requeridas .....	65
Tabela 5.15 - Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 8 hs de	



bombeamento .....	70
Tabela 5.16 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório, com 8 hs de bombeamento .....	70
Tabela 5.17 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento .....	72
Tabela 5.18 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório, com 20 hs de bombeamento .....	72
Tabela 5.19 – Culturas e respectivas áreas máximas permitidas em ha .....	75
Tabela 5.20 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento e área máxima reduzida a metade .....	76
Tabela 5.21 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água dos poços, com 20 hs de bombeamento .....	78
Tabela 5.22 – Áreas em ha por cultura e receita líquida em R\$ obtidos com a otimização para a capacidade máxima do aquífero e para apenas 1/3 da sua reserva, em ambos os casos em conjunto com o reservatório e com 20hs de bombeamento .....	79
Tabela 5.23 - Dados de vazão afluyente ao reservatório e precipitação para a série (1982-1983) que caracteriza dois anos secos .....	82
Tabela 5.24 - Dados de vazão afluyente ao reservatório e precipitação para a série (1981-1983) que caracteriza três anos secos .....	83
Tabela 5.25 - Dados de vazão afluyente ao reservatório e precipitação para a série (1980-1983) que caracteriza quatro anos secos .....	83
Tabela 5.26 - Dados de vazão afluyente ao reservatório e precipitação para a série (1979-1983) que caracteriza cinco anos secos .....	84
Tabela 5.27 - Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento, utilizando as séries plurianuais de precipitação e de vazão, correspondentes aos períodos de 1, 2, 3, 4 e 5 anos secos. ....	84
Tabela 5.28 – Áreas em ha por cultura e receita líquida em R\$ obtidos com a otimização para o ano médio, fazendo-se uso do reservatório e poços, 20hs de bombeamento, e reduções de 10%, 20%, 30% e 40%	

nos valores das vazões médias mensais afluentes ao reservatório. ....	89
Tabela 5.29 – Tabela do novo plano cultural .....	90
Tabela 5.30 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização para o novo plano cultural, fazendo-se uso da água dos poços e reservatório, com 20 hs de bombeamento .....	91
Tabela 5.31 – Resultados da otimização com o novo plano cultural fazendo uso apenas da água dos poços.....	93
Tabela 5.32 – Resultados da otimização para o período seco com a capacidade do aquífero em 1/3 da reserva para o novo plano cultural .....	95
Tabela 5.33 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização em que se maximizou a mão de obra, fazendo-se uso da água dos poços e reservatório, com 20 hs de bombeamento .....	96
Tabela 5.34 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização em que se maximizou a mão de obra, fazendo-se uso da água do reservatório, com 20 hs de bombeamento .....	97
Tabela 5.35 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização em que se maximizou a mão de obra, fazendo-se uso da água dos poços, com 20 hs de bombeamento .....	98
Tabela 5.36 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida para a terceira função objetivo, fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento .....	99
Tabela 5.37 – Receitas líquidas em R\$ obtidas com a otimização realizada para diferentes volumes iniciais do reservatório, fazendo-se uso do reservatório e poços, com 20hs de bombeamento .....	101
Tabela 5.38 – Métodos de Irrigação, eficiência e vazões específicas.....	104
Tabela 5.39 – Sistemas de irrigação por cultura adotado para cada situação .....	105
Tabela 5.40– Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização para diferentes sistemas de irrigação adotados por cultura, fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento e dados médios mensais de precipitação e vazão .....	106
Tabela 5.41 – Receitas líquidas em R\$ obtidas com a otimização realizada para diferentes preços da água retirada do reservatório, fazendo-se uso do reservatório e poços, com 20hs de bombeamento .....	108

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Ac_{ijkl}$	área ótima alocada por cultura
$Ac_{ijkl}$	Área plantada com a cultura
$A_{max}$	Área máxima total que pode ser plantada com cada cultura (ha)
$A_{min}$	Área mínima que pode ser plantada com cada cultura
$Ar_t$	Área média mensal do espelho de água do reservatório
$Atot$	Área total mensal disponível para ser plantada
$Ca_{ijk,t}$	custo da água anual
$Cb_{ijk,t}$	custo anual de bombeamento da água
$CE_{\text{água } kt}$	condutividade elétrica da água de irrigação
$CE_i$	condutividade elétrica do extrato de solo saturado
$Cp_{ijk,t}$	custo de produção anual
$Cprod_{it}$	custo atual de produção da cultura
$Csb_{ijk,t}$	custo de implantação e manutenção de um sistema de bombeamento
$Csc_{ijk,t}$	custo de construção/implantação e manutenção de canais
$Csf_{ijk,h}$	custo de construção/implantação e manutenção de fontes
$Cs_{ijk,h}$	custo de implantação e manutenção do sistema de irrigação
$Cs_{ijk,t}$	custo de implantação e manutenção dos sistemas de irrigação, de bombeamento, de fontes e canais
$Ea_i$	eficiência da aplicação da irrigação
$Ed_i$	eficiência do sistema de distribuição
$Eirr_i$	eficiência do sistema de irrigação
$Eto_{jt}$	evapotranspiração de referência
$Etp_{ijt}$	evapotranspiração potencial mensal da cultura
$Evc$	Evaporação média mensal medida no tanque de evaporação na área irrigável
$Evr$	Evaporação média mensal do tanque na área do reservatório
$G_{ij}$	dotação de água à zona radicular da cultura $i$ na unidade
$Hbprof_i$	altura máxima de sucção do sistema de bombeamento
$Hbrec_i$	altura máxima de recalque do sistema de bombeamento
$Hdc_{ij}$	número de diárias por hectare/(ano x cultura)
$H_j$	cota da unidade de produção

$H_k$	cota da parte térrea da fonte
$H_{prof_k}$	profundidade para aduzir a água da fonte
$H_{St^{o_i}}$	perda de carga percentual do sistema de irrigação para elevação de 1 m de coluna d'água
$H_{Sii}$	requerimento de pressão do sistema de irrigação da cultura
$i$	indica o tipo de cultura
$j$	indica a unidade de produção
$k$	indica a fonte de água
$Kc_a$	coeficiente de cultivo mensal da cultura
$Km$	coeficiente da equação obtido através de ajuste de curva cota x volume x área
$Ktc$	Constante de evaporação na área irrigável
$K_{Tj}$	coeficiente do tanque evaporimétrico do perímetro
$Kt$	Coeficiente de evaporação do tanque
$l$	indica o sistema de bombeamento utilizado
$LR_{ikt}$	necessidade de lixiviação dos sais
$M$	conjunto de poços ligados ao lençol freático
$mm$	expoente da equação obtido através de ajuste de curva cota x volume x área
$N$	conjunto de fontes do tipo poços
$na$	número de anos em estudo
$nb$	número de sistemas de bombeamento
$nc$	número de culturas irrigadas
$nf$	número de fontes
$nh_t$	número de horas mensais médio de trabalho do sistema de bombas
$Nl_{ijkt}$	necessidade hídrica suplementar da cultura
$nm$	número de meses em estudo
$nn$	número de unidades de produção
$np$	Número de poços
$P$	conjunto de unidades de produção pertencentes ao perímetro
$Pc$	Precipitação média mensal na área irrigável
$Pce_{jt}$	precipitação efetiva
$Pimf$	custo de manutenção da fonte
$Pisb$	custo de implantação do sistema de bombeamento
$Pisc$	custo de implantação de canais



Pisf	custo de implantação
Pisi	custo de implantação por unidade de área do sistema de irrigação
Pkwh	Preço do Kwh para cada sistema de bombas
Pmsb	custo de manutenção do sistema de bombeamento
Pmsc	custo de manutenção do sistema de canais
Pmsf	custo de manutenção da fonte
Pmsi	custo de manutenção por unidade de área do sistema de irrigação
Pr	Precipitação média mensal na área do reservatório
Pra <sub>k</sub>	preço atual da água em R\$/m <sup>3</sup> retirada da fonte
Prb <sub>l</sub>	Preço do Kwh para o sistema de bombeamento
Prc	Preço médio unitário de venda de cada cultura
Prod	Produtividade de cada cultura em cada ano
Qa	Vazão mensal afluyente ao reservatório
Qd	Vazão média mensal defluente (demanda) do reservatório
Q <sub>irr,ijka</sub>	lâmina mensal de água para a irrigação da cultura
R	Conjunto de todos canais que aduzem água diretamente do reservatório
Rb <sub>ijkh</sub>	renda bruta anual
Rl <sub>ijkl</sub>	a receita líquida
t	indica o ano
tvusb	tempo de vida útil do sistema de bombeamento
tvusc	tempo de vida útil do sistema de canais
tvusf	tempo de vida útil da fonte k
tvusi	tempo de vida útil do sistema de irrigação para a cultura
txsb	taxa anual de amortização do investimento para o sistema de bombeamento l
txsc	taxa anual de amortização do investimento para o sistema de canais
txsf	taxa anual de amortização do investimento para o sistema de fontes
txsi	taxa anual de amortização do investimento para o sistema de irrigação
Vbcap <sub>l</sub>	vazão mensal média aduzida de cada bomba
Vbmax <sub>l</sub>	capacidade máxima mensal de vazão do sistema de bombeamento
Vcanmax <sub>k</sub>	capacidade de vazão do canal
Vdef <sub>max</sub>	limite máximo da vazão descarregada do reservatório
Vdef <sub>l</sub>	Vazão descarregada do reservatório
Vextmax	Vazão extravasada máxima permitida pelo extravasor do reservatório

$V_{ext_i}$	Vazão vertida pelo extravasor do reservatório
$V_{ini}$	Volume inicial do reservatório no processo iterativo
$V_{lfmax_m}$	vazão máxima mensal suportada pela soma do volume de água retirado dos poços
$V_{rmax_i}$	volume máximo admitido para o reservatório
$V_{rmin_i}$	volume mínimo admitido para o reservatório
$V_{r_i}$	Volume do reservatório
$W_{jt}$	reserva de água no solo
$\alpha_{it}$	constante
$\Delta H_{ijkt}$	requerimento de pressão do sistema de bombeamento
$\eta_l$	eficiência do sistema de bombeamento

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar as estimativas de geração de receita líquida e emprego do perímetro irrigado de Condado (PB), através do dimensionamento otimizado de áreas para um conjunto de culturas irrigadas, fazendo-se uso da água do reservatório Engenheiro Arcoverde e do aquífero aluvial. Com isso, fornece-se subsídios para o gerenciamento da operação do reservatório e do perímetro irrigado. A ferramenta computacional utilizada na otimização do sistema é o CISDERGO (Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Operation), desenvolvido por Curi e Curi (1999), que é um programa de otimização linear recursiva. O modelo simula a operação do reservatório através da equação do balanço hídrico usando demandas fixas, para o abastecimento urbano, e variáveis, obtidas com base na necessidade suplementar líquida de irrigação, estabelecidas através do balanço hídrico das culturas selecionadas, os volumes máximos e mínimos do reservatório e os critérios de sustentabilidade hídrica através das equações de restrição do modelo. As funções objetivo são descritas em termos de maximização dos benefícios líquidos e da mão de obra auferidos com o cultivo das culturas irrigadas. O sistema em estudo localiza-se a noroeste do estado da Paraíba, no Nordeste Brasileiro, na sub-bacia do Médio Piranhas, dentro da região denominada "polígono das secas". O reservatório Engenheiro Arcoverde que tem uma capacidade máxima de 35.000.000 m<sup>3</sup>, atende ao consumo urbano de dois municípios, Condado e Malta com 36.000 m<sup>3</sup>/mês e abastece o perímetro irrigado. O perímetro de irrigação de Condado abrange uma área de 459,3 ha, sendo 230 ha de cultura irrigada e 229,3 de agricultura de sequeiro. No perímetro existe um total de 92 poços do tipo amazonas, com 72 em atividade, através dos quais é explorada as reservas subterrâneas ali existentes. As análises foram feitas sob aspectos de diferentes cenários hidroclimáticos, caracterizados como médio, seco e chuvoso, da combinação ou variação nas fontes de abastecimento, de variações nos sistemas de irrigação empregados, de mudanças no plano cultural, de variações no custo da água e variações e combinações das funções objetivo. Os resultados obtidos mostram a importância da escolha adequada das culturas, do sistema de irrigação empregado, do plano cultural e das áreas a serem plantadas, de acordo com a situação climática, especialmente em relação as culturas perenes, que precisam ser irrigadas o ano todo, para que se obtenha maior renda para o perímetro e evite o uso inadequado da água.

O estudo realizado mostra também a importância do suporte hídrico fornecido por aquíferos aluviais em perímetros irrigados, elevando a rentabilidade do mesmo. Conclui-se ainda, que para cada condição climática em que o reservatório está operando, tem-se volumes iniciais ótimos diferentes e a otimização realizada para maximizar o número de diárias empregadas no cultivo da cultura, não reduz significativamente a receita líquida.



## ABSTRACT

This work is concerned with the estimation of optimal net profit that can be obtained from the irrigation of Condado's cropland located downstream the Engenheiro Arcoverde reservoir. This reservoir has a capacity of 35 hm<sup>3</sup>, supplies 36.000 m<sup>3</sup>/month of water to Condado and Malta towns and is part of the Medio Piranhas river basin, which is located in a semiarid region at northwest part of Paraíba state, Brazil. The Condado's irrigated cropland has an area 230 ha and 72 operating amazon wells. The analysis of this system is based on scenarios in order to estimate areas for a selected set of crops and establish operational rules for the reservoir and groundwater operation. The scenarios takes into account climate, which is characterized as mean, dry and wet, initial condition for the reservoir, operational policies, which takes into account crop patterns, irrigation systems and sources of water, and sensitivity analysis of water cost and other parameters. CISDERGO (Curi and Curi, 1999), which stands for Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Optimal Operation and is based on a recursive linear programming procedure implemented in MATLAB, is used to achieve the results. The objective functions are the maximization of the net profit or required labor. All the physical, agronomic and operational constraints, including the sustainability of the reservoir, were taken into account. The results have shown the importance of an appropriate choice of a set of crops areas and patterns and the used irrigation system within a climate framework. Special attention should be paid at the sizing of areas for lasting/perennial crops. This study also shows the importance of the use of groundwater for irrigation and the initial condition of the reservoir storage for the problem. Moreover, for this problem, the difference between the net profits achieved from the maximization of the net profit or the required labor was not so significant.

## CAPÍTULO I

### 1.1 INTRODUÇÃO

O grande crescimento da população acompanhado da diversificação do uso da água como o abastecimento urbano e rural, irrigação, geração de energia, entre outros, vem tornando crescente, nos últimos anos, os conflitos existentes entre os usuários devido aos limites da disponibilidade da água. Em regiões como o Nordeste Brasileiro, onde estas situações são agravadas pela variação climática, uma eficiente operação dos sistemas de Recursos Hídricos, visando assegurar um manejo adequado dos mananciais, minimizando os desperdícios, reveste-se da maior importância.

O aumento populacional tornou ainda maior o uso do solo agricultável. Com isso, anos com chuvas abaixo da normal tem sempre significado um desastre em níveis variados para as pessoas que trabalham com a agricultura, a qual, ao lado da pecuária é uma das principais ocupações para os que vivem no semi-árido nordestino, fazendo-se necessária a aplicação de água aos solos cultivados, durante sua etapa de desenvolvimento e produção. Portanto, um planejamento cuidadoso em perímetros de irrigação, capaz de aumentar a produtividade, a renda e a geração de emprego, pode promover uma melhoria nas condições de vida dos produtores rurais.

A irrigação é uma das práticas mais antigas utilizadas pelo homem para produzir seus alimentos. Com a finalidade de aumentar essa produção o homem se viu

forçado a mudar o curso de pequenas correntes de água, construir diques para armazenar e regular seus recursos, explorar aquíferos e por em prática, a princípio, várias técnicas simples de irrigação e drenagem, lhe permitindo manter água para realizar uma agricultura menos arriscada e mais intensiva (Levien, 2000).

Nas regiões Nordeste e Centro-Sul do Brasil, a irrigação tem sido alvo de considerável interesse por constituir uma técnica que proporciona alcançar a máxima produção, em relação as demais técnicas agrícolas. No meio empresarial rural, a nova tendência tem sido a de aumentar o interesse pela prática da irrigação, que além de reduzir riscos, proporciona outras vantagens significativas ao produtor irrigante. Essa tendência, também, é alimentada pelo aumento do custo da terra, aliado ao considerável capital necessário à exploração agrícola, os quais não permitem mais que a produção final dependa de ocorrência ou não de um regime pluviométrico adequado. Além de que, a intensificação da prática de irrigação serve de estratégia para aumentar a oferta de produtos destinados ao mercado interno, consolidar a afirmação comercial do Brasil no mercado internacional e melhorar os setores que estão ligados direta ou indiretamente às atividades da agricultura irrigada, em termos de níveis de produção, produtividade, renda e emprego (Lima et al., 1999).

Embora existam grandes benefícios advindos do uso de irrigação, os métodos utilizados podem ser aprimorados para minimizar os impactos sobre as reservas hídricas como os problemas correlatos de erosão dos solos, assoreamento dos corpos de água, salinização e falta de controle no uso de fertilizantes e biocidas. A agricultura irrigada também é uma atividade humana, que caracteriza-se por um alto uso consuntivo e uma grande demanda da quantidade total de água, exigindo, portanto, um uso criterioso e racional da mesma.

Principalmente nas regiões semi-áridas onde é grande a escassez de água, é preciso evitar os desperdícios na irrigação, bem como garantir as demandas de consumo humano e animal, e as demais que se fazem necessárias para o desenvolvimento e bem estar da população da região. Para tanto, é fundamental o conhecimento das relações funcionais entre a água e o rendimento das culturas, seja em termos de produtividade ou de retorno financeiro.

O manejo racional de irrigação consiste na aplicação de quantidade de água necessária para manter a umidade do solo num nível ótimo para o crescimento das plantas. Muitos projetos regionais não atingiram os resultados esperados em razão de não ter sido adotado um método de controle da irrigação e de manejo da água nas propriedades agrícolas, onde produtores irrigam em excesso, comprometendo a produção, além de desperdiçar água.

Segundo estudo feito pela Companhia Energética de Minas Gerais, CEMIG, haveria uma economia de 20% de água e 30% da energia consumida para a realização da irrigação se esta fosse utilizada de forma racional.

Somente nas últimas décadas se tratou a irrigação com um enfoque científico racional que permite utilizar o recurso água com maior eficiência.

Nestas circunstâncias, o desenvolvimento e adaptação de técnicas de otimização para o planejamento e gerenciamento dos sistemas complexos de recursos hídricos torna-se indispensável. Em recursos hídricos, a atividade de planejamento pode ser definida como um conjunto de procedimentos organizados que visam ao atendimento das demandas de água, considerada a disponibilidade restrita desse recurso e a sua alocação entre usos múltiplos. A gestão dos recursos hídricos realiza-se mediante procedimentos integrados, de planejamento e administração. A alocação dos recursos hídricos entre usos múltiplos é problema bastante complexo, cuja solução deve ser procurada com técnicas de análises de sistemas (Barth, 1987). A análise de sistemas de recursos hídricos apresenta os propósitos de simular o comportamento da realidade desses sistemas e otimizar os processos decisórios que atuam sobre esta realidade. Isto dá margem a utilização de duas técnicas: a de simulação e a de otimização.

Os primeiros modelos de otimização empregados no planejamento de recursos hídricos surgiram levando em consideração um objetivo único na análise custo/benefício. No entanto, com o grande desenvolvimento na área de informática e em modelagem matemática está se tornando possível fazer a otimização para mais de um objetivo, como por exemplo, benefícios econômicos e sociais, tais como a maximização de mão-de-obra, permitindo assim analisar situações mais abrangentes.

O sistema em estudo é composto pelo reservatório Engenheiro Arcoverde,

perímetro de irrigação e poços amazonas, os quais estão localizados a noroeste do Estado da Paraíba, no Nordeste Brasileiro, na sub-bacia do Médio Piranhas, dentro da região denominada “polígono das secas”. O reservatório Engenheiro Arcoverde atende ao consumo urbano de duas cidades, Condado e Malta, com 36.000 m<sup>3</sup>/mês de água e abastece o perímetro irrigado que tem uma área de 240 ha de cultura irrigada. O açude por ser destinado a múltiplos usos, incluindo entre eles o da irrigação, tem sido fonte de conflitos entre os usuários, principalmente nos anos críticos, de baixa pluviometria, exigindo uma operação otimizada em conjunto com os poços amazonas existentes no perímetro, através dos quais os colonos captam água para suprir as necessidades hídricas dos seus lotes de irrigação.

Tendo em vista o exposto acima, propõe-se neste trabalho através de um modelo de programação linear, otimizar a seleção de culturas do perímetro irrigado no município de Condado (PB), fazendo-se uso da operação do reservatório Engenheiro Arcoverde e do aquífero aluvial, sujeitos a restrições, levando em consideração os critérios de múltiplos usos, múltiplos objetivos e sustentabilidade hídrica. A sustentabilidade hídrica do sistema é garantida quando o reservatório apresenta o seu volume final igual ou maior que o volume no início da simulação, permitindo assim, a repetição de todo o processo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos Gerais**

Estudar o comportamento e as condições de operação ótima e conjunta do sistema composto pelo reservatório Engenheiro Arcoverde, Perímetro Irrigado de Condado e aquífero aluvial, sob os aspectos de estimativas de potencialidade de geração de renda e emprego e de uso da água do reservatório e do aquífero.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Com as seguintes funções objetivos:

- Maximização da receita líquida auferida com irrigação,
- Maximização da geração de empregos,

Proceder-se-á:

a) Verificação do comportamento do sistema em termos de:

- volume de água apropriado do sistema para cada um dos múltiplos usos, especificando:
  - Vazões mensais captadas do reservatório e
  - Vazões mensais captadas dos poços,
- Volumes mensais do reservatório,
- Receita líquida total para cada cultura selecionada pelo modelo de otimização,
- Número de empregos gerados,

b) Verificação do comportamento do sistema quando submetido a extração de água subterrânea levando-se em conta a capacidade máxima do aquífero,

E ainda para a função objetivo que maximiza a Receita líquida, será feito:

- c) Verificação da influência sobre a receita líquida e o volume de água usado para a irrigação com alterações no plano cultural em relação a época do plantio de determinadas culturas,
- d) Determinação do volume inicial ótimo do reservatório com garantia de

- sustentabilidade hídrica para cada ciclo climático,
- e) Verificação da influência das alterações nos sistemas de irrigação, sobre a receita líquida e o volume de água usado para irrigação,
  - f) Análise de sensibilidade do modelo, com alterações no preço da água,
  - g) Verificação do comportamento do sistema em termos de receita líquida e uso da água quando sujeito a reduções nas vazões afluentes.

A metodologia proposta para a otimização será um programa de otimização linear recursiva.

Em recursos hídricos, a aplicação da programação linear tem sido uma técnica bastante utilizada em situações complexas de gerenciamento e operação de reservatórios, apesar de apresentar limitações para um tipo especial de problemas: todas as relações entre as variáveis são lineares, tanto na função objetivo como nas funções de restrição. Os problemas práticos de otimização frequentemente envolvem comportamento não-linear que deve ser levado em consideração. Porém, alguns artifícios, como linearização de funções podem ser empregados para permitir o uso de otimização linear na solução do problema.

A ferramenta computacional utilizada neste trabalho é o CISDERGO (Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Operation) desenvolvido por Curi e Curi (1999), que é um programa de otimização linear recursiva, ou seja, leva em consideração a natureza não linear do problema de forma recursiva. É um programa desenvolvido no ambiente MATLAB, e é destinado a maximizar múltiplos benefícios/objetivos relativos à implantação ou melhoramento da operação de um ou mais perímetros irrigados. Para isso pode-se, de forma integrada, otimizar o uso da água aduzida de reservatório, poços e rios.

O estudo desenvolvido apresenta-se descrito ao longo dos seguintes capítulos:

Capítulo I – Introdução

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Capítulo III – Caracterização e dados Hidroclimáticos do Sistema em Estudo



Capítulo IV – O Modelo de Programação Linear

Capítulo V – Descrição dos Cenários para Otimização e Análise dos Resultados

Capítulo VI – Conclusões e Recomendações

## CAPÍTULO II

### 2.1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita uma revisão literária sobre o emprego da otimização em operação de reservatórios, sendo mais direcionado ao estudo da programação linear, a qual é a técnica utilizada neste trabalho. Será realizado ainda uma abordagem sobre técnicas multiobjetivo e estudos de caso serão apresentados.

Roefs (1967) apud Barros e Braga (1991) foi o responsável pelos primeiros trabalhos realizados em otimização de operação de reservatórios, nos Estados Unidos. Segundo o citado autor, os métodos mais indicados para a modelagem da operação de reservatórios são: a simulação, a otimização determinística e estocástica e a análise de regressão associada a modelos otimizantes determinísticos.

A Simulação tem por objetivo representar e operar o sistema detalhadamente, através de um conjunto de expressões matemáticas estruturadas em sequência lógica e fornecer informações para avaliar o comportamento do sistema real. Esta técnica não tem nenhuma exigência quanto a natureza do problema, a não ser a de que ele possa ser formulado matematicamente. Em operação de reservatório, a simulação consiste no balanço de massa do mesmo a cada intervalo de tempo. Os modelos de otimização são algoritmos matemáticos que procuram identificar os pontos máximos ou mínimos da chamada função objetivo, que representa por meio de expressão matemática os objetivos

estabelecidos na operação. A solução ótima é encontrada iterativamente, processando-se diversas simulações alternativas e comparando seus desempenhos (Braga et al., 1998). Os principais métodos aplicados nos modelos de otimização são a programação linear, programação não linear e a programação dinâmica.

Uma revisão dos modelos de operação e dimensionamento de reservatórios é encontrada em Yeh (1985). Braga Jr. (1987) também apresenta uma vasta revisão sobre os modelos de simulação e otimização aplicados a operação de reservatórios enquanto Barbosa (1997a) apresenta uma revisão sobre modelos de programação linear em Recursos Hídricos.

A Programação Linear (PL) é uma técnica bastante conhecida e aplicada na solução de problemas de otimização. O termo linear está relacionado à necessidade de haver relações lineares entre as variáveis, traduzidas pelas equações que descrevem o problema. O termo programação se associa ao planejamento de atividades. Em termos matemáticos formais, a PL foi estabelecida em 1947 por G. B. Dantzig para resolver problemas de logística da Força Aérea Americana. Na área de Recursos Hídricos, nos Estados Unidos, as primeiras aplicações ocorreram na década de 60, no âmbito dos trabalhos do "Harvard Water Resources Group", onde fez-se uma aplicação da PL a um problema de gerenciamento de água subterrânea (Barbosa, 1997a).

Os problemas mais comuns que ocorrem em Recursos Hídricos envolvem comportamento não-linear, entretanto, sob certas hipóteses, problemas não lineares podem ser linearizados e resolvidos iterativamente ou por procedimentos de aproximação (Chiang, 1982 apud Cunha, 1999). Porém, apesar da Programação Linear apresentar uma limitação por exigir a linearidade de todas as funções, ela tem a capacidade de tratar de problemas de grande porte, comuns em recursos hídricos, além da flexibilidade para adaptação a uma grande variedade de problemas e uma maior facilidade de entendimento, comparada a outras técnicas de otimização.

Em otimização de reservatórios, utilizando a programação linear existem vários trabalhos realizados. Medeiros e Occhipinti (1987), utilizaram-se da programação linear na otimização de reservatórios na bacia do Alto Tietê e bacias vizinhas sujeitos a múltiplos usos, analisando a aplicabilidade de programação linear mista ou inteira com variações de

0 ou 1. Bianco et al. (1987), também, utilizaram a programação linear para auxiliar na tomada de decisão de caráter operativo em tempo real. O trabalho apresenta a concepção dada ao sistema de monitoramento, arquivamento e processamento das variáveis hidrológicas, em tempo real, destinada a fornecer subsídios para a tomada de decisão de caráter operativo. Burman et al. (1992) fizeram uso da programação linear no planejamento da cultura irrigada, no Perímetro irrigado do Baixo de Irecê, no Estado da Bahia. Mello Jr. et al. (1997) desenvolveram um modelo de programação linear com restrições probabilísticas para estabelecer a política operacional ótima de reservatórios, levando-se em consideração os propósitos de proteção à enchente, abastecimento municipal, suprimento à irrigação e valores máximos e mínimos de armazenamento e descarga, onde o objetivo consistiu na minimização da diferença entre a descarga máxima e a mensal. Oliveira e Lanna (1997) apresentaram o desenvolvimento de regras de operação para um sistema composto por cinco reservatórios para atender as demandas urbanas e de irrigação na bacia do rio Acarau, no Estado do Ceará. A metodologia adotada foi a utilização conjunta de modelos de otimização linear e de simulação e a função objetivo da operação foi a maximização dos benefícios líquidos do sistema. Os autores comentam em suas conclusões sobre a importância das técnicas de otimização em fornecer informações para o dimensionamento e operação ótima de sistemas de recursos hídricos. Pilar et al. (1998) apresentam uma alternativa de programação separável, que utiliza a aproximação através de poligonais às funções não lineares, o que viabiliza seu tratamento através da programação linear. A metodologia foi aplicada ao estudo de otimização de dimensão de projetos de irrigação na bacia do rio Paracatú, no estado de Minas Gerais. Oliveira (2000) estudou a maximização dos benefícios econômicos com a exploração do perímetro irrigado nas várzeas da cidade de Souza, no estado da Paraíba, via programação linear recursiva.

Os trabalhos de Curi e Curi (1998), Cunha (1999) e Mohammadi (1998) fazem uso da programação linear em otimização integrada de reservatórios superficiais e subterrâneos. Curi e Curi (1998) desenvolveram uma metodologia via programação linear recursiva para a otimização integrada de reservatório, poços e culturas irrigadas, considerando um único objetivo, aplicada à determinação da área irrigada e a operação do reservatório Engenheiro Arcoverde e dos poços do perímetro irrigado da cidade de Condado, PB. Cunha (1999) tratou em sua dissertação para a mesma região de estudo, o Perímetro Irrigado de Condado, a otimização do uso da água do Reservatório Engenheiro

Arcoverde em conjunto com um volume anual estimado da disponibilidade do aquífero que pode ser aduzido dos poços lá existentes. A otimização foi realizada para uma única função objetivo e utilizou-se também da programação linear. Um modelo de otimização integrada também foi desenvolvido por Mohammadi (1998) para planejamento em sistemas de irrigação. Em seu trabalho, as capacidades dos reservatórios superficiais e dos subterrâneos, como também canais, estações de bombeamento, túneis, áreas disponíveis para a irrigação e as culturas são consideradas partes integrantes do sistema. O modelo é baseado na programação linear e o sistema é otimizado por meio do modelo de otimização com restrições, para uma única função objetivo.

Alguns trabalhos em otimização utilizando as técnicas multiobjetivo encontram-se citados nesta revisão. Barros et al. (1991) que através do chamado Método Monte Carlo, trabalharam com otimização estocástica implícita da operação de sistemas de reservatórios considerando múltiplos objetivos, quando da fixação da regra operativa do sistema. Para considerar os múltiplos objetivos, empregou-se o Método das Restrições, no qual os diversos objetivos são confrontados pelo levantamento das chamadas “Curvas de Soluções Dominantes”.

Estudos feitos em planejamento utilizando a técnica multiobjetivo em áreas de irrigação são encontrados em Gates et al. (1991) e Heyder et al. (1991). Mello Jr. e Braga (1996) desenvolveram uma estrutura de cálculo para otimizar um sistema de rotação de culturas irrigadas, para maximizar a receita líquida e minimizar a degradação do solo durante a produção agrícola. Através da programação linear, o modelo foi formulado para dois métodos de análise multiobjetivo: o SWT (Método de Troca de Valor Substituto) e o PM (Método de Ponderação de Metas). O SWT apresentou na solução um conjunto de pontos não-inferiores, estabelecendo trocas entre os objetivos e a solução ótima dependerá da preferência do responsável pela decisão. O PM forneceu uma única solução como resultado de melhor negociação entre os desvios das metas.

Segundo Braga et al. (1998), a abordagem tradicional de seleção de alternativas baseada na análise técnico-econômica, através de Análise Custo-Benefício, tem, com a grande disponibilidade de recursos de informática, cedido lugar a uma abordagem mais abrangente que considera múltiplos objetivos. A abordagem multiobjetivo permite evidenciar os objetivos que podem ser econômicos, ambientais, sociais, entre outros, e

quantificar o grau de compromisso (trade-offs) existente entre eles. Uma revisão sobre técnicas de Programação Multiobjetivo encontra-se em Cohon e Marks (1975), Braga e Gobbetti (1997) e Barbosa (1997b).

A análise multiobjetivo pode ser vista como uma extensão dos modelos de otimização com um único objetivo. A classificação das técnicas multiobjetivo, dependendo da forma em que são utilizadas as preferências do decisor, e da natureza do problema, pode ser feita da seguinte maneira (Cohon e Marks, 1975 e Braga et al., 1998):

#### - Técnicas de Geração das Soluções Não-Dominadas

Entre estes métodos estão: Método dos Pesos, Método das Restrições e o Método Multiobjetivo Linear. O Método dos Pesos e o Método das Restrições identifica o conjunto de soluções não-inferiores, ou seja, aquelas para as quais só há possibilidade de melhorias de um objetivo piorando outro. No primeiro método as funções objetivo são ponderadas através de pesos formando uma nova função objetivo. No segundo método, elege-se um objetivo como principal, enquanto os outros ficam restritos a algum valor. O Método do Multiobjetivo Linear é baseado no uso do método simplex para problemas de programação linear.

#### - Técnicas com Articulação de Preferências a Priori

Nestas técnicas antes da resolução do problema, solicita-se a opinião do decisor para obter a ordenação das soluções não-dominadas. As principais técnicas que compõem esse grupo são: Método da Função de Utilidade Multidimensional, Método da Programação por Metas, Método Electre, Método de Matriz de Prioridades e o Método Promethee.

#### - Métodos com Articulação Progressiva das Preferências.

Aqui, a interação analista - decisor ocorre ao longo de todo o processo decisório. Entre essas técnicas, têm-se: Método dos Passos e o Método de Programação de Compromisso.

Existe ainda situações em que existe mais de um decisor com interesses conflitantes, onde são utilizados métodos para “resolução de conflitos” como os métodos

derivados da Teoria dos Jogos.

Vários estudos tem sido feitos no sentido de avaliar os métodos multiobjetivo. Gobbetti e Barros (1993) fizeram uma comparação entre os métodos Promethee, Electre, Programação de Compromisso e o método de Função de Utilidade Multidimensional, aplicados a um caso brasileiro.

Cohon et al. (1979) desenvolveram o método NISE (The Noninferior Set Estimation Method), limitado para trabalhar com duas funções objetivo e que é aplicável para funções lineares. O trabalho desenvolvido por Teixeira e Barbosa (1995), visou atender a seleção de alternativas de projeto de barragens de uso múltiplo, levando em consideração dois objetivos: (1) eficiência econômica; (2) a qualidade ambiental. As técnicas multiobjetivo utilizadas foram o método dos Pesos, Electre I e Electre II e no modelo foi adotado uma formulação linear.

A adequação do tipo de modelo a ser aplicado ao problema depende de vários fatores, como a disponibilidade de informações, a natureza do problema, recursos de informática, tradição no uso da técnicas, entre outros (Barbosa, 1997a).

Neste trabalho foi empregado o modelo de otimização linear para uma única função objetivo e para duas funções objetivo, com objetivos ponderados por diferentes pesos, sendo portanto usado o método dos pesos.

Não é de conhecimento do autor referências a respeito do uso de técnicas de otimização realizadas para mais de uma função objetivo, via programação linear recursiva para sistemas integrados de perímetros irrigados, reservatório sujeito a múltiplos usos e aquífero aluvial.

## **CAPÍTULO III**

### **CARACTERÍSTICAS E DADOS HIDROCLIMÁTICOS DO SISTEMA EM ESTUDO**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Localizado a noroeste do Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil, no chamado “polígono das secas”, o sistema em estudo é composto pelo reservatório Engenheiro Arcoverde, 72 poços amazonas e perímetro de irrigação do município de Condado. A região é parte integrante da Bacia do Médio Piranhas (Figura 3.1) que faz parte do conjunto das seis sub-bacias que compõe a bacia do rio Piranhas, em uma altitude de 250 metros sob coordenadas geográficas de 6° 54’ 30” de latitude sul e 37° 35’ 50” de longitude a oeste de Greenwich. A bacia do Médio Piranhas é constituída por 13 municípios: Belém do Brejo do Cruz, Catolé do Rocha, Brejo do Cruz, Brejo dos Santos, São Bento, Bom Sucesso, Jericó, Riacho dos Cavalos, Lagoa Paulista, Pombal, Vista Serrana, Condado e Malta, que representa 7,60 % do total de municípios que compõem o Estado da Paraíba.



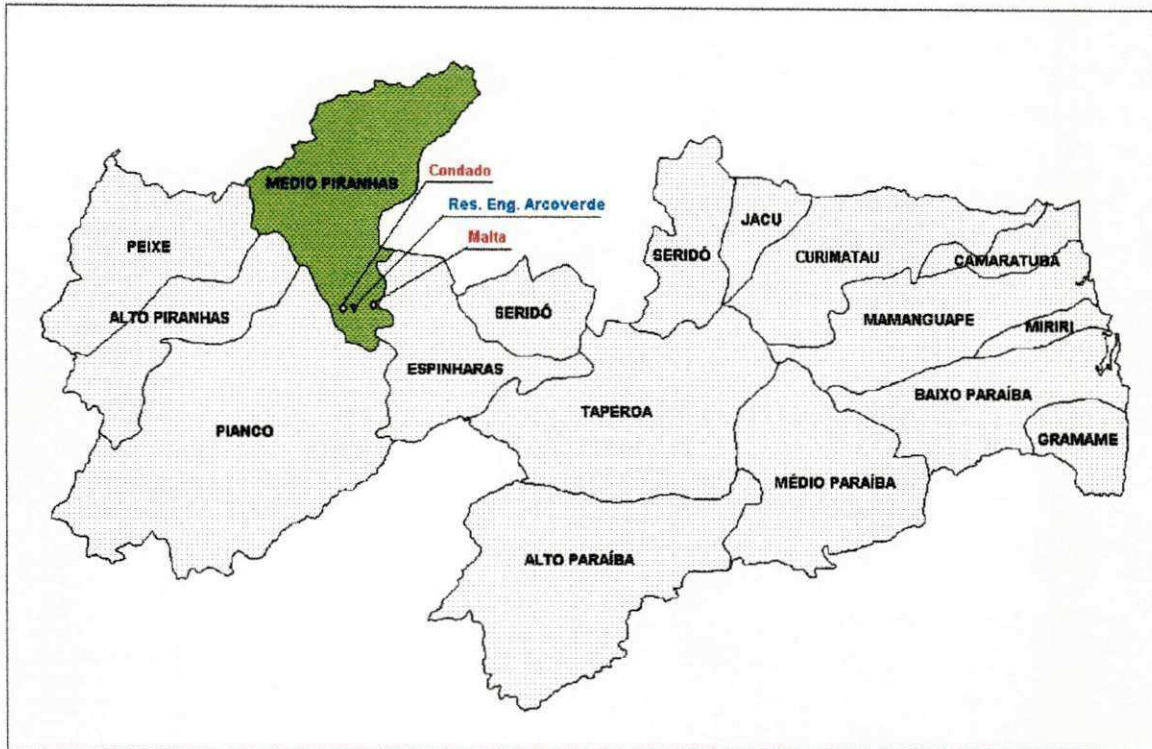


Figura 3.1 – Bacias do Estado da Paraíba com destaque para a Bacia do Médio Piranhas

## 3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

### 3.2.1 – Aspectos Fisiográficos

#### Vegetação

A vegetação natural dominante na área da bacia do Médio Piranhas é a caatinga hiperxerófila e suas principais espécies nativas são: Favela, Marmeleiro, Pereiro, Capim-Panasco, Jurema, Pinhão, Juazeiro, Catingueira, Malva, Aroeira, Gitirana, Bredo, Oiticica, Jaramataia, Mucambê, Vassourinha, Coroa-de-Frade, Caraibeira, Velame e Capim Pé de Galinha.

## Relevo

A região se caracteriza por possuir uma topografia acentuada, principalmente nos divisores da bacia onde se observa a presença da serra do Melado ao norte e outras elevações ao oeste da bacia com altitudes superiores a 500 m. Suas serras fazem parte do sistema da Borborema.

## Solos

Predomina na bacia hidrográfica, onde o açude está inserido, os seguintes tipos de solos:

- Solo Bruno Não Cálcico Vérticos e não Vérticos de pouca espessura, associados com solos Litólicos Eutróficos, existentes na maior parte da bacia;
- Solos Aluviais, restritos a faixas estreitas e a jusante da barragem;
- Solos Podzólicos Vermelho Amarelo Eutróficos, dominantes nos interflúvios, principalmente nas áreas cortadas por afluentes da margem esquerda do rio Piranhas.

Foi feita através do mapa Pedológico da Paraíba um reconhecimento do solo para um raio de 10 Km da barragem, correspondente uma área de 315,5 Km<sup>2</sup> (Cunhá, 1999). O resultado encontra-se na Figura 3.2, a seguir:

**Categorias de Solo da Bacia Hidrográfica do Açude Eng. Arcoverde**

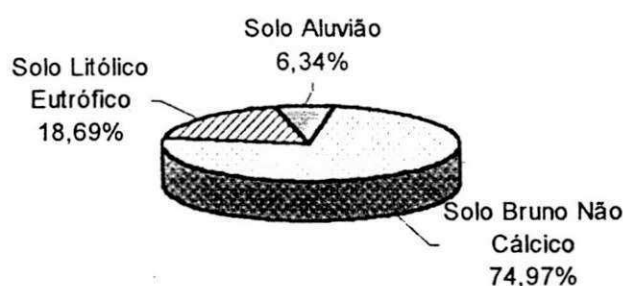


Figura 3.2 – Categorias de Solo de Bacia Hidrográfica do Açude Engenheiro Arcoverde.

### 3.2.2 – Climatologia

#### Clima

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos (Paraíba, 1994), a bacia do açude Engenheiro Arcoverde apresenta as seguintes classificações para o clima:

- Koppen –Aw', que é influenciado pela Massa Equatorial Norte e apresenta uma estação seca de inverno e outra chuvosa de verão-outono.
- Gausсен- 4aTh , que é tropical quente com estação seca longa, de 7 a 8 meses.

#### Temperatura

A temperatura média mensal na região do município de Condado varia de 24°C a 27°C, porém nos períodos mais quentes, a temperatura máxima pode chegar a 34°C conforme dados obtidos do Atlas Climatológico do Estado da Paraíba (1987). Os meses mais quentes correspondem ao período de outubro a dezembro, e os menos quentes de maio a agosto.

#### Umidade relativa do ar

Os dados da umidade relativa do ar, registrados no posto climatológico de Patos, dá uma idéia do comportamento desta variável também na região em estudo. Os dados medidos neste posto apresentam valores médios anuais de 49 %, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Umidade relativa do ar (%) do Posto de Patos

Mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média
Umid.relativa	47	53	60	57	54	51	48	44	42	41	42	44	49

Fonte: Plano Estadual dos Recursos Hídricos – (Paraíba, 1994)

### **Insolação**

A duração efetiva do dia (número de horas de brilho do sol) na região do município de Condado apresenta a seguinte variação nos valores médios mensais: entre os meses de fevereiro e julho, ocorre uma insolação que varia entre 7 e 8 horas diárias; entre os meses de agosto e janeiro a insolação varia entre 8 e 9 horas diárias (Atlas Climatológico do Estado da Paraíba, 1987).

### **Velocidade do Vento**

Adotou-se para o estudo dos ventos a estação climatológica de Patos, que representa bem a região em estudo, cujo valores médios mensais variam entre 2m/s e 3m/s (Atlas Climatológico do Estado da Paraíba, 1987).

### **Evaporação**

A evaporação média mensal da bacia hidrográfica do reservatório Engenheiro Arcoverde, estimada a partir de dados do Tanque Classe A operado pela SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste) no posto de Patos, apresenta valores mensais máximos em torno de 350mm e mínimos de 150mm. A evaporação anual situa-se em torno de 2200 mm.

### **Regime Pluviométrico**

A pluviometria anual média da bacia, considerando os dados dos postos pluviométricos das cidades de Condado e Malta, no período de 1973-1991, situa-se em torno de 860 mm. O período chuvoso vai de janeiro até maio, sendo o trimestre mais chuvoso fevereiro, março e abril. Os meses de agosto, setembro e outubro ficam sobre o efeito da estiagem prolongada, representando o trimestre mais seco.



### 3.2.3 – O Reservatório Engenheiro Arcoverde

O açude público Engenheiro Arcoverde, localiza-se no município de Condado e tem seus recursos hídricos geridos pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas). Foi construído ao longo de cinco anos (1932-1936), com uma capacidade máxima de acumulação de 35.000.000 m<sup>3</sup> (trinta e cinco milhões de metros cúbicos) visando atender a demanda das cidades de Condado e Malta e posteriormente ao perímetro de irrigação ali implantado (Figura 3.3). A Figura 3.4 apresenta o Layout do sistema em estudo.

A bacia do açude Engenheiro Arcoverde está inserida na bacia hidrográfica do Médio Piranhas e faz parte do conjunto das seis sub-bacias que compõem a bacia do rio Piranhas. A Bacia Hidrográfica de Drenagem do açude tem um perímetro de 68,67 km e uma área de 124 Km<sup>2</sup> e a área média da Bacia Hidráulica é de 4,41 Km<sup>2</sup> (Figura 3.5).

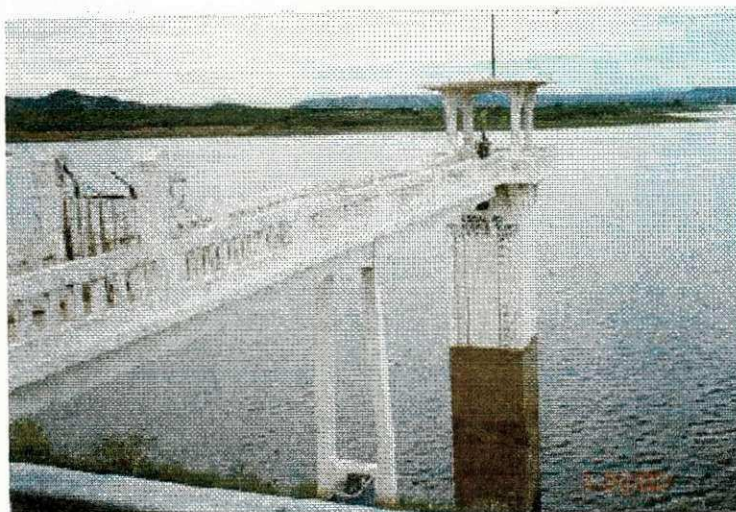


Figura 3.3 – Açude Engenheiro Arcoverde

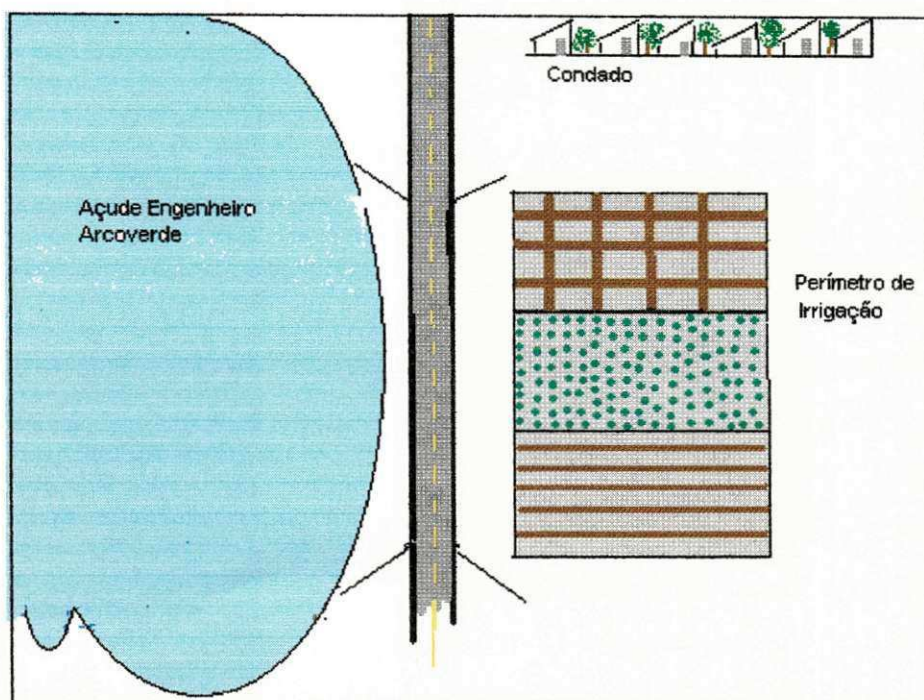


Figura 3.4 – Layout do sistema em estudo

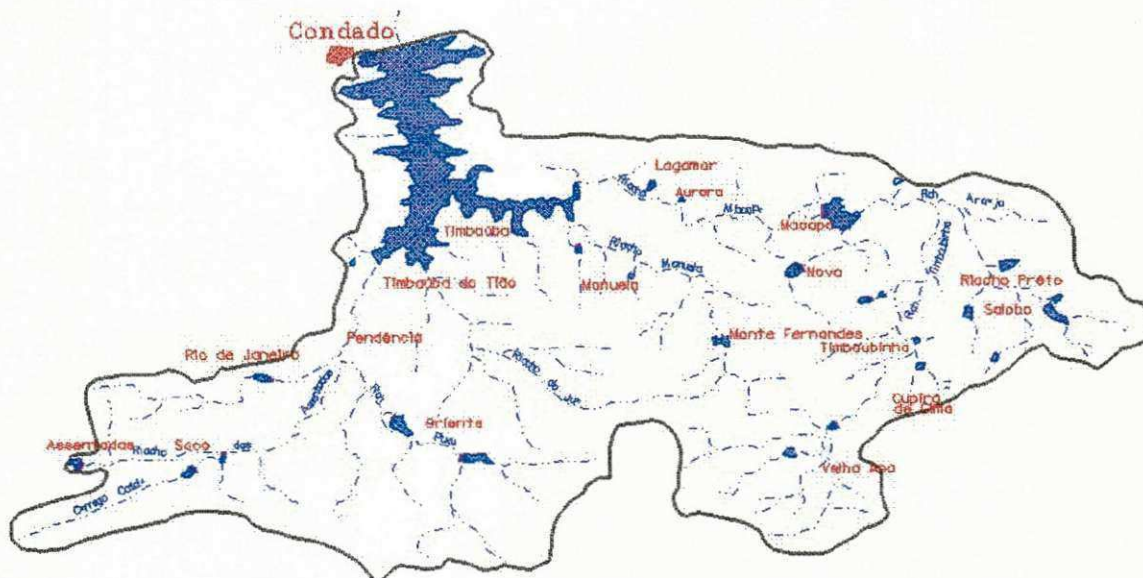


Figura 3.5 – Bacia Hidrográfica de drenagem do açude Engenheiro Arcoverde

O açude abastece as cidades de Condado e Malta, cujas demandas totalizam uma vazão de 427.030 m<sup>3</sup>/ano ou 35.585,83 m<sup>3</sup>/mês, segundo dados fornecidas pela CAGEPA

(Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba) ao DNOCS. A cidade de Condado fica 1 Km distante da estação de bombeamento e sua demanda é atendida através de um sistema com duas bombas de 15 CV, funcionando 24 horas por dia, enquanto que a cidade de Malta fica 9 Km distante da estação de bombeamento e tem sua demanda atendida através de um sistema com duas bombas de 30 CV funcionando 24 horas por dia.

#### Características do Reservatório Engenheiro Arcoverde:

##### Barragem:

- Tipo de Barragem: Terra homogênea
- Altura Máxima: 20,76 m
- Extensão do Coroamento: 1.079 m

##### Outras Informações:

- qualidade da água do reservatório; C1-S1
- Taludes: Montante - 2:1; jusante- 2:1
- Volume morto : 3.010.000 m<sup>3</sup>
- Largura do Coroamento: 7 m
- Largura Máxima da Base: 91,6m
- Comprimento do Maior Afluente ( riacho Timbaúba): 19,55 Km
- Cota de Tomada d'água: 7,10 m
- Diâmetro da tubulação de tomada d'água: 900 mm

#### 3.2.4- Perímetro de Irrigação de Condado

O Perímetro de Irrigação de Condado abrange uma área de 459,3 ha, sendo que 230 ha é de agricultura irrigada e 229,3 ha de agricultura de sequeiro. As principais culturas encontradas no perímetro irrigado são as culturas permanentes: banana, goiaba e coco e as culturas temporárias: tomate, melancia, melão, feijão, milho e arroz. Os sistemas de irrigação usados para essas culturas são: o sulco, a aspersão e o gotejamento.

O perímetro atende a 53 famílias (aproximadamente 200 pessoas), das quais 25 famílias (100 pessoas) dependem totalmente do abastecimento de água do açude para



garantir o seu sustento. As demais contam com a água de poços amazonas (Figura 3.6) construídos nos aluviões à jusante do citado açude.

Existe um total de 92 poços, porém atualmente só 72 encontram-se em atividade utilizando bombas de 7,5 CV, 10 CV, 12CV, e 15 CV, as quais trabalham em média de 6 a 8 horas por dia.

Caracteriza, ainda, o perímetro de irrigação de Condado, um conjunto de estradas internas que permite a ligação entre diversos pontos de sua área e atende razoavelmente às necessidades locais de vias de transporte. As estradas principais se estendem, a partir da sede do posto agrícola, acompanhando o curso do riacho das Timbaúbas e dos canais principais e secundários de irrigação existentes. Os canais tem estrutura de concreto armado e seção trapezoidal, sendo que os principais são chamados de P1 (canal leste) e P2 (canal oeste). A seção dos canais principais é dada por: base maior, 1,50m; base menor, 0,7m; altura, 1,40m e a extensão dos mesmos totaliza 15.088m, e os canais secundários tem seção de: base maior, 1m; base menor, 0,5m; altura, 0,8m e a extensão destes canais totaliza 36.000 m (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Canais de irrigação e poços amazonas do Perímetro de Condado

Todas as estradas são de terra, sendo que as principais têm uma largura média de 4 m e as demais, que cortam todo o perímetro, são mais estreitas. O transporte para outras localidades é basicamente realizado através da rodovia federal BR-230, a margem da qual o perímetro de irrigação se localiza e que passa pela barragem do açude. Por essa estrada se alcança Patos, Campina Grande e João Pessoa, a leste e a oeste, Pombal, Sousa e Cajazeiras, se conectando ao estado do Ceará.



### 3.2.5 – O Aquífero Aluvial de Condado

O aquífero aluvial do perímetro de Condado é, predominantemente, constituído de areias finas, médias e grossas. As argilas aparecem formando dois níveis estratigráficos: o primeiro constitui a superfície do terreno com espessura média de 0,5 m e a segunda camada argilosa situa-se entre 4,0 e 5,0 m ou 6,0 e 7,0 m de profundidade em relação a superfície do terreno com espessura entre 2,0 e 3,0 m. As espessuras aluviais ao longo do perímetro irrigado variam entre 2,0 e 9,0 m, com maiores ocorrências no intervalo de 4,0 a 6,0 m. As espessuras saturadas variam com o tempo, em função da exploração a que é submetido o aquífero e da sua recarga (Rêgo e Albuquerque, 1999).

Segundo Albuquerque et al. (1998) a escassez de recursos hídricos na área semi-árida da Paraíba, como em todo o Nordeste, tem como consequência a exploração de parte das reservas dos tipos de aquíferos existentes nestas regiões, que são os aquíferos aluviais e o cristalino. Outros aspectos que devem ser levados em consideração são os benefícios sócio-econômicos desse tipo de exploração e o baixo impacto causado ao meio ambiente. Além disso, estes aquíferos são facilmente recarregáveis, pelo menos o sistema Aluvial, devido a sua natureza, dimensões e ligações hidráulicas com o sistema hidrográfico.

A capacidade total do aquífero é determinada pela suas disponibilidades, ou seja, volume de água máximo que pode ser aproveitado do aquífero, anualmente, sem que se produza um efeito indesejável de qualquer ordem. No caso de aquíferos aluviais, essa disponibilidade é o volume de água que pode ser anualmente explorado do mesmo, onde, em geral, o limite da disponibilidade é a potencialidade. Denomina-se potencialidade a parcela dos recursos de água subterrânea que escoam naturalmente, sem intervenções artificiais no aquífero, originados dos cursos d'água superficiais estabelecidos sobre o aquífero com a ocorrência das chuvas e que formam o escoamento de base dos mesmos. No caso de aquíferos aluviais, pela facilidade de recarga que apresenta, a potencialidade pode ser acrescida uma parcela das reservas. As reservas de água subterrânea são as parcelas dos recursos acumuladas nos interstícios intergranulares dos aluviões, que somente circulam quando solicitadas por intervenções artificiais, tais como através de poços, o que se verifica no perímetro de Condado (Rêgo e Albuquerque, 1999).

Estudos feitos por Rêgo e Albuquerque (1999) entre os anos de 1998 e 1999 fornecem subsídios para se trabalhar com os valores da reserva do aquífero de Condado

para um período seco, já que suas potencialidades não foram possíveis de se determinar devido a ausência de chuvas nestes dois anos. Segundo os responsáveis pelo estudo, existem dois valores para as reservas, uma para os anos normais, nos quais espera-se que as reservas sejam totalmente recompostas por recarga ocorrida no período chuvoso e uma para os anos secos, que corresponde a recarga parcial da reserva. No primeiro caso esse valor corresponde a aproximadamente  $1.236.895 \text{ m}^3/\text{ano}$  e no segundo caso, a  $650.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Contudo, recomenda-se, como medida de segurança para o caso de ocorrência de um período de três anos consecutivos de seca, uma exploração máxima correspondente a  $1/3$  dessas reservas.

Assim, as disponibilidades para um ano seco com previsão de continuidade por mais um ano, seria a soma do escoamento de base, que é zero neste caso devido ausência de chuva, mais  $1/3$  de  $650.000 \text{ m}^3$ , ou seja, cerca de  $280.000 \text{ m}^3$  por ano ou  $23.000 \text{ m}^3$  por mês.

Em anos normais e chuvosos,  $1/3$  das reservas desse período,  $412.298 \text{ m}^3$ , mais as recargas que venham a ocorrer com a ocorrência de chuva, permitem estimar uma capacidade de exploração máxima do aquífero em torno de  $100.000 \text{ m}^3$  por mês. Este valor também foi adotado para este estudo no caso de um ano seco, com previsão de ocorrência de chuvas em torno da média para o ano seguinte.

### **3.3 DADOS HIDROCLIMATOLÓGICOS DO SISTEMA EM ESTUDO**

#### **3.3.1 - Pluviometria**

Os dados de precipitação da bacia hidrográfica do açude Engenheiro Arcoverde utilizados neste estudo foram registrados no posto pluviométrico de Condado, os quais foram analisados por Cunha (1999).

Para o preenchimento de falhas e homogeneização destes dados foram utilizados os registros pluviométricos mensais dos postos de Malta, Santa Teresinha e Catingueira (Tabela 3.2), cedidos pelo LMRS (Laboratório de Meteorologia e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba). O método utilizado por Cunha (1999) para a análise de consistência

e preenchimento de falhas foi o programa APLUV (desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal da Paraíba/Campus II), que utiliza o método de Ponderação Regional com Base em Regressão Linear Simples. A Tabela 3.3 apresenta os dados de precipitação média homogeneizados da bacia hidrográfica da região em estudo para o período de 1973 a 1991. Para a análise de consistência dos dados foi utilizado o método Dupla Massa, o qual mostrou uma boa consistência dos dados utilizados (Figura 3.7)

Tabela 3.2 - Relação dos postos pluviométricos utilizados no estudo

Código	nome	lat. (graus)	long. (graus)	alt. (m)	Ano (início)	Ano (final)
3834877	Condado	6 54'	37 37'	260	1941	1989
3834894	Malta	6 54'	37 32'	340	1934	1991
3845113	Sta. Teresinha	7 05'	37 27'	380	1962	1991
3844279	Catingueira	7 08'	37 37'	290	1934	1991

Tabela 3.3 - Precipitação média mensal homogeneizada da bacia hidrográfica

Ano	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago	Set.	Out.	Nov.	Dez	Total
1973	78,2	46,5	147	399,4	121,8	49,1	24,6	12,4	4,9	15,6	2,2	27	928,5
1974	219,9	263,5	275	444,9	136,4	34,8	22,6	1,6	10,1	15	46,4	31,4	1501,4
1975	64,1	286,2	294,3	252,9	117,4	29,6	60	4,4	0,1	2,1	3,4	24,6	1138,9
1976	29,6	152,9	243,2	131,4	46,4	7,2	3	1,5	8,9	35	16,6	15,2	690,6
1977	83,3	105,2	213,9	287,9	102,4	32,6	30,6	8,7	3,3	4,6	6,1	48,5	927,1
1978	57,3	204,8	144,7	191	145,3	89,1	69,4	14,5	9,1	5,9	17,6	3,6	952,2
1979	66	142,6	129,7	136,2	68,2	21,4	11,2	6,1	25,7	34	37,8	27,8	706,3
1980	58	225,9	119,4	48,2	8,7	17,9	7,9	6,4	9,2	13,5	18,2	11,3	544,3
1981	83,7	22,3	404,4	42,7	7,5	15,4	7,4	6,4	8,1	8,2	35,5	28,3	669,6
1982	21,5	45,8	87,4	245,2	54,9	14,3	10,2	7,2	8,6	7,9	12,6	18,5	533,9
1983	34,7	103,1	136,6	48,3	14,6	11,5	8,4	9,5	8,1	13,4	4,9	9,8	402,7
1984	34,3	28,6	201,4	288,1	106,3	14,6	19,6	12,7	3,7	9,7	11	9,2	739,2
1985	150,8	435,5	265,4	373,9	89	122,3	14,4	7,4	6,6	11,3	10,4	86,8	1573,7
1986	120	248,2	330,9	212,6	45,7	15,6	16	12,3	7,1	7,4	16	13,3	1045
1987	42,1	101,4	329,8	54,8	11,7	26,1	7,7	5,5	4,4	4,8	5,7	4,3	598,1
1988	42,5	92,1	215,3	358,9	80,7	9	16,9	7,3	4,4	4,8	4	35,7	871,6
1989	46,4	67,2	156,7	433,6	132,4	47	69,7	9,1	4,4	5,4	4,3	111,1	1087,1
1990	10,5	63	11,1	84	26,8	49,6	12,1	34,8	8,5	11,8	5,8	78	395,8
1991	72,2	91,6	278,4	54	96,6	12,9	76,3	11,9	12,8	80,1	35,3	13,5	835,5
Méd.	69,2	143,5	209,7	215,2	74,4	32,6	25,7	9,5	7,8	15,3	15,5	31,5	849,7

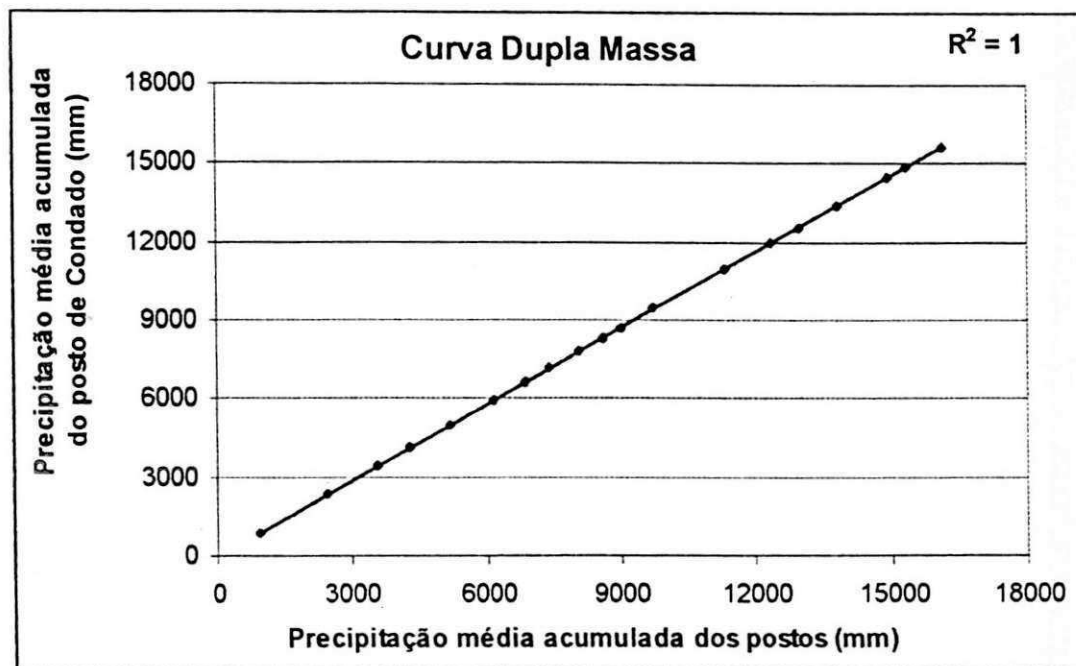


Figura 3.7 – Curva de Dupla Massa anual da pluviometria do posto de Condado em relação a média anual dos postos pluviométricas da região (1973-1991).

### 3.3.2 - Fluviometria

Os dados de vazões afluentes ao reservatório Engenheiro Arcoverde, gerados a partir do modelo chuva-vazão Tank Model, por não existir na região de estudo uma estação fluviométrica, foram fornecidos pela ATECEL/UEPB (1998). Em seguida temos uma breve descrição do modelo Tank Model. As lâminas escoadas geradas pelo modelo encontram-se a seguir na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Lâminas mensais afluentes ao reservatório, simuladas, em milímetro, pelo modelo Tank Model

Ano	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez
1973	0	0	10,2	65,9	20,2	0	0	0	0	0	0	0
1974	24,7	33,3	35,6	88,7	26,8	0	0	0	0	0	0	0
1975	0	37,8	39,4	36,5	9,5	0	0	0	0	0	0	0
1976	0	11,4	29,3	7,8	0	0	0	0	0	0	0	0
1977	0	1,9	23,5	38,1	7,2	0	0	0	0	0	0	0
1978	0	21,7	9,8	18,9	9,9	0	0	0	0	0	0	0
1979	0	9,3	6,8	8,1	0	0	0	0	0	0	0	0
1980	0	25,8	4,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1981	0	0	67,7	3,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1982	0	0	0	29,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1983	0	1,5	8,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1984	0	0	21	38,1	8	0	0	0	0	0	0	0
1985	11	78,8	43,9	70,2	14,4	5,3	0	0	0	0	0	0
1986	4,9	30,2	46,6	31,9	0	0	0	0	0	0	0	0
1987	0	1,2	46,4	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
1988	0	0	23,7	52,2	9,4	0	0	0	0	0	0	0
1989	0	0	12,1	78,2	24,3	0	0	0	0	0	0	3,1
1990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1991	0	0	36,2	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0

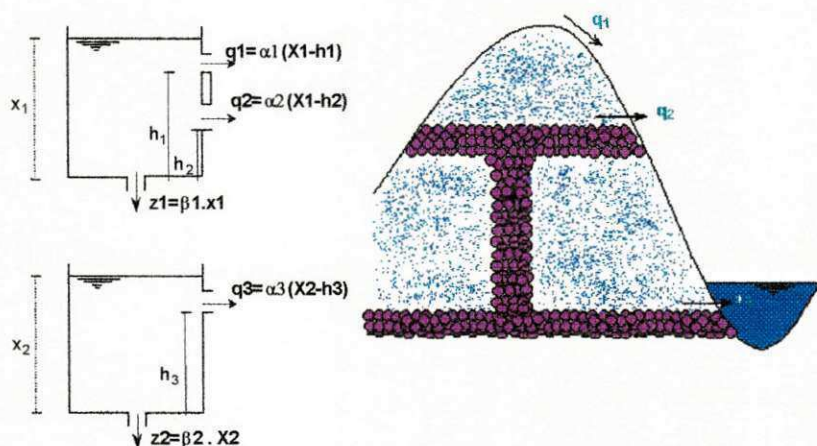
### 3.3.2.1 - O Modelo Tank Model

O Tank Model é um modelo matemático de simulação chuva-vazão, de formulação simples e concebido após o fim da Segunda Guerra Mundial por Sugawara (1979). Vários autores têm aplicado o Tank Model em diversas bacias hidrográficas (Góis e Suzuki, 1987, Diniz e Góis, 1993, ATECEL/SEPLAN/PB, 1994). O modelo constitui-se de reservatórios hipotéticos representando camadas estratificadas de solo, com suas respectivas características de retenção e transferência de água, através de uma sucessão de tanques fictícios alinhados verticalmente e descritos por equações diferenciais ordinárias.

A simulação da operação destes reservatórios representa uma parte do ciclo hidrológico pelo qual passa uma determinada precipitação até atingir como escoamento superficial ou subterrâneo, o curso d'água. A abstração de água na bacia ocorre pela evaporação direta da precipitação, pelo escoamento da bacia e pela infiltração profunda,

caso ocorra. O escoamento da bacia em seu exutório, é calculado de forma simplificada, dado pelo somatório dos diferentes escoamentos nos diversos extratos do solo a cada evento de precipitação (Figura 3.8).

O modelo Tank Model pode operar tanto a nível mensal como a nível diário e apresenta bom desempenho na aproximação dos mecanismos físicos gerais que governam os processos hidrológicos.



Figuras 3.8 - Esquema para representação da estrutura do modelo Tank Model

### 3.3.3 - Evaporação

Os dados de evaporação utilizados foram os do tanque classe A da estação evaporimétrica de Patos, a qual tem características fisiográficas semelhantes a região onde está inserido o reservatório Engenheiro Arcoverde e que não apresenta estação climatológica. Os valores da evaporação medida em tanques classe A superam os obtidos em reservatórios devido as diferenças de volume, superfície e localização. Daí a necessidade de se ter um fator de correção (coeficiente do tanque -  $K_p$ ) que corrija as evaporações medidas no tanque classe A para representar a evaporação no reservatório.

O coeficiente do tanque depende do meio que o circunda e das condições atmosféricas locais. O valor de  $K_p$  corrige a evaporação do tanque para a superfície cultivada (perímetro de irrigação). Estudos feitos por Doorenbos e Kassam (1979), expressam o coeficiente do tanque classe A para diferentes coberturas de terreno,

diferentes níveis de umidade relativa média do ar e velocidade total do vento. Para o perímetro em estudo o  $K_p$  adotado foi 0,75 em função da região ter umidade relativa média do ar de 49% e velocidade do vento de 2,5 m/s .

Os dados de evaporação observados no posto evaporimétrico de Patos estão expressos na Tabela 3.5 abaixo, já aplicado o fator de correção ( $K_p$ ).

Tabela 3.5 – Evaporação observada corrigida (mm) em tanque Classe A na estação de Patos

mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Evap	216,8	157,1	127,9	122,3	108,8	143,9	160,5	204,5	225,8	259,7	212,7	222,8

### 3.3.4 - Volumes Defluentes Fixos

As demandas assumem uma média mensal de 36.000 m<sup>3</sup> para o abastecimento dos municípios de Condado e Malta, conforme os dados fornecidos pelos órgãos competentes como: CAGEPA e Departamento de Administração do Perímetro de Irrigação.

### 3.3.5 – Balanço Hídrico no Reservatório

Foi feito por Cunha (1999), em sua dissertação de mestrado, uma análise para a verificação da qualidade dos dados hidrológicos utilizados no modelo (precipitação, evaporação, demandas hídricas, afluxos), através do balanço hídrico.

O balanço hídrico do reservatório Eng. Arcoverde foi feito para o período de 1974 a 1980 (96 meses- período em que o perímetro irrigado estava em plena atividade) e representa as variações de seus armazenamentos mensalmente ao longo do período, sendo expresso pela seguinte equação :

$$V_{i+1} = V_i + V_P + V_A - V_E - V_{DEM} \quad (3.1)$$

Onde:

$V_{i+1}$  -- volume de água no reservatório no final do mês i

$V_i$  – volume do reservatório no início do mês  $i$

$V_P$  – volume precipitado sobre o reservatório durante o mês  $i$

$V_A$  – volume afluente ao reservatório durante o mês  $i$

$V_E$  – volume evaporado do reservatório durante o mês  $i$

$V_{DEM}$  – volume defluente devido a demanda das cidades de Condado, Malta e o Perímetro de irrigação durante o mês  $i$ , para o qual foi assumido o valor de  $135.000 \text{ m}^3$  por mês, conforme informações do Departamento de Administração do Perímetro de irrigação.

Os volumes de precipitação, evaporação e vazão foram calculados multiplicando-se seus valores mensais em mm pela área média do espelho d'água obtida a partir da curva Cota-Área (Figura 3.9).

A Tabela 3.6 fornece os volumes mensais observados no reservatório para o período de 1974-1980, cedidos pelo LMRS (Laboratório de Meteorologia e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba). A Figura 3.10 apresenta os volumes observados e os calculados através do balanço hídrico do reservatório durante o período de 1974 a 1980.

A Figura 3.11 fornece a curva Cota-Volume do reservatório Engenheiro Arcoverde.

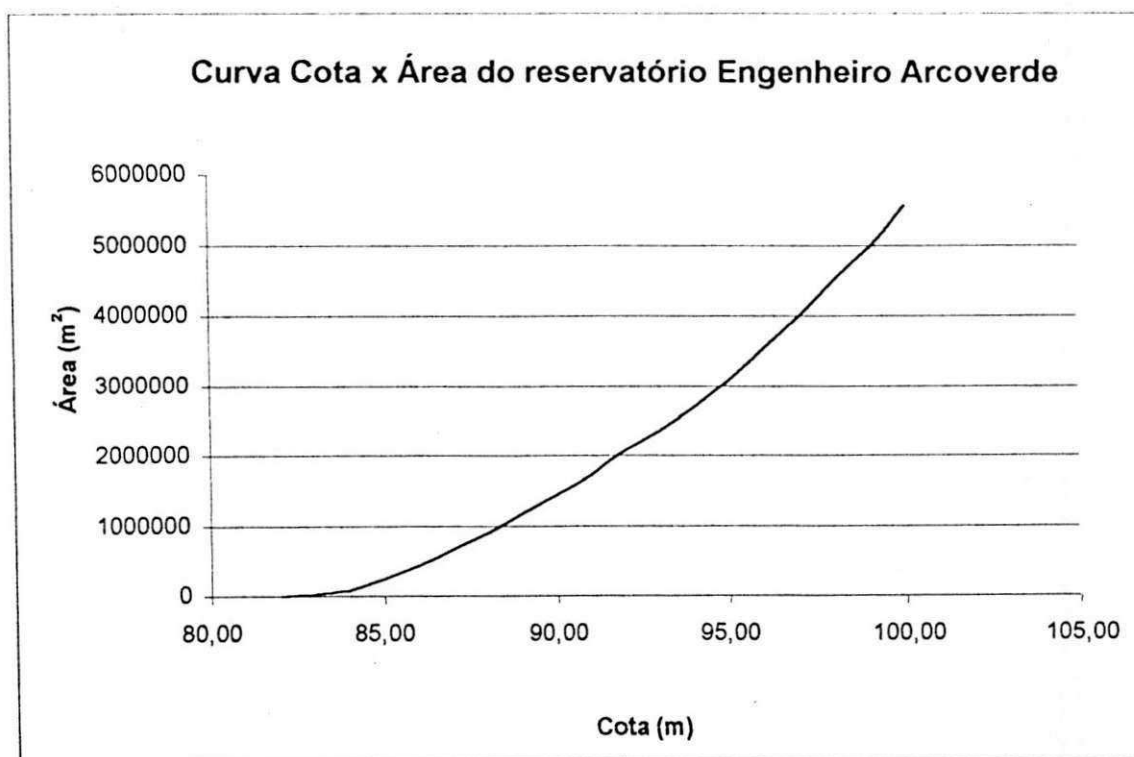


Figura 3.9 - Curva Cota x Área do espelho líquido do reservatório Eng. Arcoverde



Tabela 3.6 – Volume mensal observado no Reservatório para o período de 1974-1980 em m<sup>3</sup>

Período	Volume m <sup>3</sup> /mês	Período	Volume m <sup>3</sup> /mês	Período	Volume m <sup>3</sup> /mês
Jan/74	15,845,622	Mai/76	20,431,610	Set/78	23,788,735
Fev/74	25,098,450	Jun/76	18,694,131	Out/78	21,873,098
Mar/74	31,548,600	Jul/76	17,008,750	Nov/78	19,989,075
Abr/74	32,515,751	Ago/76	15,246,875	Dez/78	18,444,370
Mai/74	33,515,139	Set/76	13,815,375	Jan/79	17,302,407
Jun/74	34,482,290	Out/76	12,527,035	Fev/79	17,269,780
Jul/74	33,792,010	Nov/76	11,079,715	Mar/79	16,617,230
Ago/74	32,325,165	Dez/76	9,635,030	Abr/79	16,584,602
Set/74	30,258,320	Jan/77	8,012,495	Mai/79	15,899,425
Out/74	29,175,753	Fev/77	8,956,285	Jun/79	14,846,055
Nov/74	28,133,485	Mar/77	11,907,355	Jul/79	13,471,815
Dez/74	27,104,922	Abr/77	25,068,460	Ago/79	11,957,515
Jan/75	25,829,952	Mai/77	34,525,432	Set/79	10,652,355
Fev/75	29,909,185	Jun/77	33,964,580	Out/79	9,240,920
Mar/75	34,837,430	Jul/77	32,713,447	Nov/79	8,255,645
Abr/75	34,549,677	Ago/77	31,419,172	Dez/79	7,200,012
Mai/75	34,252,333	Set/77	29,520,902	Jan/80	6,900,712
Jun/75	33,964,580	Out/77	27,450,062	Fev/80	6,918,135
Jul/75	33,101,730	Nov/77	25,621,665	Mar/80	11,631,475
Ago/75	31,764,312	Dez/77	24,580,227	Abr/80	11,154,955
Set/75	30,340,610	Jan/78	23,163,873	Mai/80	10,176,235
Out/75	28,442,340	Fev/78	25,538,350	Jun/80	9,394,185
Nov/75	26,802,925	Mar/78	29,046,335	Jul/80	8,518,385
Dez/75	25,413,377	Abr/78	28,701,195	Ago/80	7,499,812
Jan/76	24,580,227	Mai/78	29,564,045	Set/80	6,620,118
Fev/76	23,663,762	Jun/78	28,312,912	Out/80	5,752,320
Mar/76	22,622,325	Jul/78	27,277,492	Nov/80	4,951,837
Abr/76	22,181,827	Ago/78	25,528,350	Dez/80	4,193,000

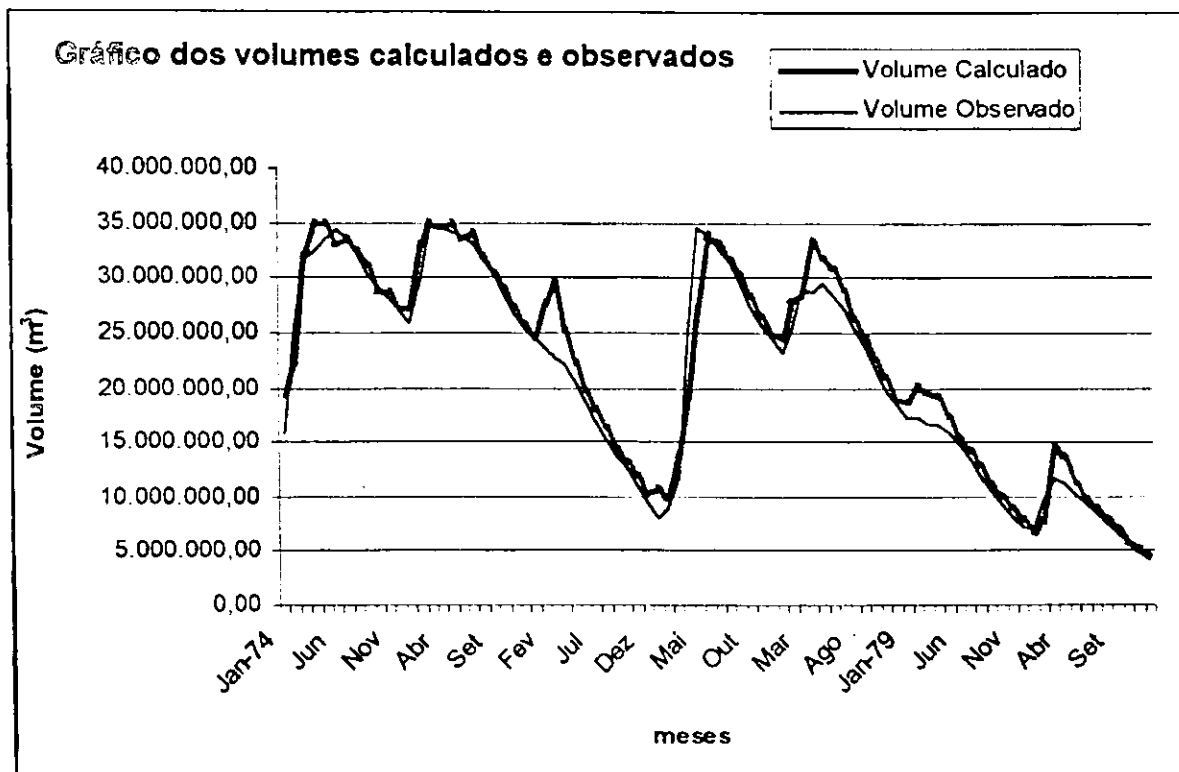


Figura 3.10 - Volume observado e Volume calculado do reservatório Eng Arcoverde por Cunha (1999), ao longo do período de janeiro de 1974 a dezembro de 1980

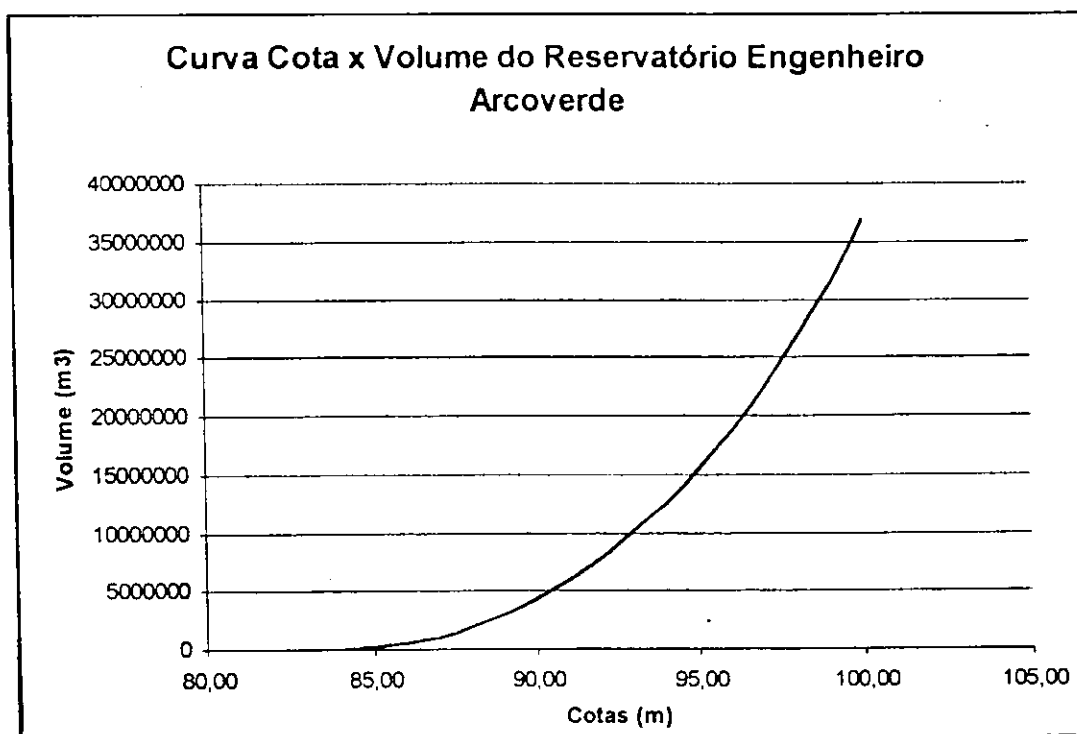


Figura 3.11 - Curva Cota x Volume do reservatório Eng. Arcoverde

## CAPÍTULO IV

### O MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

#### 4.1 - INTRODUÇÃO

O modelo utilizado neste trabalho é o CISDERGO (Cropping and Irrigation System Design with Optimal Reservoir and Groundwater Operation), desenvolvido por Curi e Curi (1999). Ele é um programa de otimização linear recursiva, ie, leva em consideração a natureza não linear do problema de forma recursiva, desenvolvido no ambiente MATLAB, destinado a maximizar múltiplos objetivos relativos a implantação ou melhoramento da operação de um ou mais perímetros irrigados, otimizando o uso da água aduzida de um reservatório e poços. O modelo simula a operação do reservatório através da equação do balanço hídrico do mesmo usando demandas fixas e variáveis, obtidas com base na necessidade suplementar líquida de irrigação, estabelecidas através do balanço hídrico das culturas selecionadas e levando em consideração os demais usos do reservatório. A otimização aqui empregada também leva em consideração os diferentes tipos de sistemas de irrigação e suas necessidades de altura manométrica, as áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura, custos de água e de produção, aspectos econômicos e a combinação ou variação nas fontes de bombeamento e a quantidade de água aduzida.

A ferramenta MATLAB (Matriz Laboratory) foi utilizada como ambiente computacional para desenvolver o modelo. Esta ferramenta foi criada pelas Universidades Norte Americanas de Novo México e de Stanford no início da década de 1970, tem a capacidade de fazer análise numérica, cálculo matricial, processamento de sinais e gráficos de forma simples onde os problemas e as soluções são expostos da mesma forma como são escritos matematicamente, sem a necessidade da tradicional programação.

Em geral, o modelo de otimização é constituído por uma função objetivo  $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , que se quer maximizar ou minimizar, onde,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  são as  $n$  variáveis de decisão do problema. Além da função objetivo, podem comparecer também as  $m$  funções de restrição  $g_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,  $i=1, 2, \dots, m$  que determinam a região viável das variáveis de decisão. Assim pode-se representar o problema de otimização através de:

$$\text{Max(Min)} F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.1)$$

sujeito a

$$\begin{aligned} g_1(X_1, X_2, \dots, X_n) &> b_1; < b_1; = b_1 \\ g_2(X_1, X_2, \dots, X_n) &> b_2; < b_2; = b_2 \\ g_m(X_1, X_2, \dots, X_n) &> b_m; < b_m; = b_m \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde, além das variáveis definidas anteriormente,  $b_i$ ,  $i=1, 2, \dots, m$  são parâmetros do modelo. O conjunto de valores das variáveis de decisão  $X_1, X_2, \dots, X_n$  que satisfaz ao sistema de equações (4.2) é chamado de solução viável. Dentre as soluções viáveis, aquela que também satisfaz a (4.1) é chamada de solução ótima.

A programação linear, caracteriza-se pelo estabelecimento de relações lineares, ou seja, todas as equações envolvidas são necessariamente representadas por variáveis do primeiro grau.

No caso de problema de otimização multiobjetivo, com  $m$  equações de restrição,  $n$  variáveis de decisão e  $p$  objetivos, pode ser formulado como:

$$\begin{aligned} &\text{Max(Min)} F(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ &= [F_1(X_1, X_2, \dots, X_n), F_2(X_1, X_2, \dots, X_n), \dots, F_p(X_1, X_2, \dots, X_n)] \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde  $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$  é a função multiobjetivo e  $F_1(X_1, X_2, \dots, X_n), \dots, F_p(X_1, X_2, \dots, X_n)$  as funções individuais.

Neste trabalho foram utilizadas duas funções objetivo: maximização da receita líquida e maximização da mão de obra, as quais serão descritas a seguir. A otimização foi realizada para cada uma individualmente e para as duas em conjunto (otimização para múltiplos objetivos), em que foram atribuídos pesos à cada função objetivo, conforme o

Método dos Pesos citado no Capítulo II, gerando uma equação do tipo:

$$\text{Max } F(x) = w_1.F_1 + w_2.F_2 \quad (4.4)$$

Onde  $w_1$  e  $w_2$  são os pesos atribuídos a cada função individual.

## 4.2 – FUNÇÕES OBJETIVO DO MODELO CISDERGO

### 4.2.1 – Maximização da Receita Líquida

Uma das funções objetivo do modelo é a maximização da receita líquida sujeita às restrições de disponibilidade de água, área a ser irrigada, capacidade de bombeamento e estrutural. A receita líquida é a diferença entre a renda bruta total ( $Rb_{jt}$ ) obtida com a venda das produções das culturas e os custos de produção total que envolvem custos de água, bombeamento e de produção. Portanto, a **receita líquida**,  $RI_{ijkl}$  em R\$/cultura/unidade de produção/fonte/sistema de bombeamento, é dada por:

$$RI_{ijkl} = \sum_{t=1}^{na} \prod_{m=1}^t (1 + d_m) \left( \prod_{n=1}^t (1 + dc_{in}) * Rb_{ijkl} - Cp_{ijkl} - Ca_{ijkl} - Cb_{ijkl} - Cs_{ijkl} \right) \quad (4.5)$$

onde:

$\prod_{m=1}^t (1 + d_m)$  - fator de atualização monetária referente a taxa de (inflação) desvalorização,

$d_m$ , da moeda no ano  $m$

$\left( \prod_{n=1}^t (1 + dc_{in}) \right)$  - fator de atualização monetária referente a expectativa da taxa de

crescimento ou decréscimo nos preços,  $dc_{in}$ , além do nível da inflação, da cultura  $i$  no ano  $n$ , que pode ser positiva ou negativa.

$i$  - indica o tipo de cultura ( $i=1, \dots, nc$ )

$j$  - indica a unidade de produção ( $j=1, \dots, nn$ )

$k$  - indica a fonte de água ( $k=1, \dots, nf$ )

$l$  - indica o sistema de bombeamento utilizado ( $l=1, \dots, nb$ )

$t$  - indica o ano,  $t=1, \dots, na$

$nc$  - número de áreas irrigadas destinadas a diferentes culturas

$nn$  - número de unidades de produção

$nf$  - número de fontes

$nb$  - número de sistemas de bombeamento

$na$  - número de anos em estudo

$Rb_{ijklt}$  - renda bruta anual em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte de água/sistema de bombeamento

$Cp_{ijklt}$  - custo de produção anual em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte de água/sistema de bombeamento

$Ca_{ijklt}$  - custo da água anual em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte de água/sistema de bombeamento

$Cb_{ijklt}$  - custo anual de bombeamento da água em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte de água/sistema de bombeamento

$Cs_{ijklt}$  - custo de implantação e manutenção dos sistemas de irrigação, de bombeamento, de fontes e canais em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte de água/sistema de bombeamento

A **renda bruta anual**,  $Rb_{ijklt}$ , em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte de água/sistema de bombeamento, pode ser dada por:

$$Rb_{ijklt} = Prod_{jt} * Prc_j * Ac_{ijkl} \quad (4.6)$$

onde:

$Prod_{jt}$  - produtividade da cultura  $i$  no ano  $t$  de irrigação em Kg/ha,

$Prc_j$  - Preço atual de comercialização da cultura  $i$  em R\$/Kg e

$Ac_{ijkl}$  - Área plantada com a cultura  $i$  na unidade de produção  $j$  com água aduzida da fonte  $k$  pelo sistema de bombas  $l$ .

O **custo de produção anual**,  $Cp_{ijklt}$ , em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte de água/sistema de bombeamento, relativos aos gastos com insumos, mão de obra e máquinas, pode ser dado por:

$$CP_{ijklt} = C_{prod_{it}} * Ac_{ijkl} \quad (4.7)$$

onde:

$C_{prod_{it}}$  = custo atual de produção da cultura  $i$  referentes à gastos relativos ao ano  $t$  em RS/ha.

Para se determinar o custo da água utilizada para a irrigação e o seu bombeamento, é necessário se determinar a quantidade de água alocada para irrigação, i.e., a lâmina de rega. Num primeiro passo, calcula-se a necessidade hídrica máxima mensal desta planta para desempenhar as suas atividades vegetativas ao longo do seu ciclo fenológico, ou seja, calcula-se a taxa de **evapotranspiração potencial** mensal da cultura  $i$  na unidade de produção  $j$  (do perímetro  $p$ ) durante o mês  $t$ ,  $Etp_{ijt}$ , em mm/mês, que pode ser estimada, de forma aproximada, em função da taxa de **evapotranspiração de referência** no mês  $t$  na unidade de produção  $j$ ,  $Eto_{jt}$  em mm/mês, que, por sua vez, pode ser representada por:

$$Eto_{jt} = K_{Tj} * Evc_{jt} \quad (4.8)$$

onde:

$t$  - indica o mês,  $i=1, \dots, nm$

$nm$  - número de meses em estudo

$p$  - conjunto de todas as unidades de produção que pertencem ao perímetro  $p$

$K_{Tj}$  - coeficiente do tanque evaporimétrico do perímetro  $p$  ( $j \in P$ )

$Evc_{jt}$  - taxa de evaporação mensal média em mm/mês de um tanque evaporimétrico, normalmente do tipo classe A ( $j \in P$ ) colocado no perímetro  $p$ .

Logo:

$$Etp_{ijt} = Kc_{it} * Eto_{jt} \quad (4.9)$$

onde:

$Kc_{it}$  - coeficiente de cultivo mensal da cultura  $i$  que reflete a sua necessidade hídrica no mês  $t$

Para se determinar a lâmina de rega, necessita-se calcular a **precipitação efetiva** ( $Pce_{jt}$ ) que, sob o ponto de vista agrônomo, é a taxa da precipitação que infiltra no solo e fica disponível para a planta, no mês  $t$  na unidade de produção  $j \in P$ , em mm/mês, dado por (FAO, 1988):

$$\begin{aligned} Pce_{jt} &= 0,8 * Pc_{jt} - 25 \text{ se } Pc_{jt} \geq 75mm \\ &0,6 * Pc_{jt} - 10 \text{ se } Pc_{jt} < 75mm \end{aligned} \quad (4.10)$$

onde:

$Pc_{jt}$  - taxa de precipitação mensal média em mm/mês que ocorre no perímetro  $p$ .

A **necessidade hídrica suplementar** da cultura  $i$ , na unidade de produção  $j$  durante o mês  $t$ ,  $Nl_{ijkt}$  em mm/mês, pode ser dada por:

$$Nl_{ijkt} = Etp_{ijt} - Pce_{jt} - G_{ijt} - W_{jt} \quad (4.11)$$

onde:

$G_{ijt}$  - dotação de água à zona radicular da cultura  $i$  na unidade de produção  $j$  durante o mês  $t$  por capilaridade em mm que depende do tipo de solo e do nível do lençol freático (Hillel, 1971), e

$W_{jt}$  - reserva de água no solo no mês  $t$  em mm, que depende da capacidade de armazenamento de água no solo na unidade de produção  $j$ .

Neste trabalho,  $G_{ikt}$  e  $W_{kt}$  foram considerados iguais a zero.

Por outro lado, a quantidade de água a ser aduzida para cada tipo de cultura  $i$  dependerá, também, da **eficiência do sistema de irrigação**,  $Eirr_i$ , que, por sua vez, é resultado do produto entre a *eficiência do sistema de distribuição*,  $Ed_i$ , e da *eficiência da aplicação*,  $Ea_i$ , ou seja:

$$Eirr_i = Ea_i * Ed_i \quad (4.12)$$

e da **necessidade de lixiviação dos sais** dissolvidos que se acumulam no solo que, dependendo da tolerância de cada cultura  $i$ , é dada em função da fração de água mínima destinada a lavar tais sais da fonte de água  $k$  no mês  $t$ ,  $LR_{ikt}$  em %. Rhoades e Merrill



(1976) citados por Gomes (1999), propuseram as seguintes equações para se determinar  $LR_{ikt}$ :

- Para irrigação por inundação ou aspersão de baixa frequência:

$$LR_{ikt} = \frac{CE_{\acute{a}gua kt}}{5 * CE_i - CE_{\acute{a}gua kt}} \quad (4.13)$$

- Para irrigações de alta frequência (gotejamento e microaspersão):

$$LR_{ikt} = \frac{CE_{\acute{a}gua kt}}{5 * CE_i} \quad (4.14)$$

onde:

$CE_{\acute{a}gua kt}$  - condutividade elétrica da água de irrigação advinda da fonte k durante o mês t em mmhos/cm, medida a 25°C,

$CE_i$  - condutividade elétrica do extrato de solo saturado, em mmhos/cm, e que acarreta uma determinada redução no rendimento potencial da cultura i.

Neste trabalho, não se dispo de dados sobre a condutividade elétrica do extrato do solo saturado de cada perímetro, não foram avaliadas dotações para água de lixiviação.

Conforme sugerido por Ayers e Westcot (1985), escolhe-se o valor de  $CE_i$  que acarreta uma redução 10% do rendimento potencial da cultura i para a aplicação da Equação 4.13 e de 100% para a aplicação da Equação 4.14. Logo, a **lâmina mensal de água para a irrigação** da cultura i da unidade de produção j com água aduzida da fonte k durante o mês t,  $Q_{irr_{ijkt}}$ , em mm/mês, a ser fornecida pelo sistema, será dada por:

$$Q_{irr_{ijkt}} = \frac{N_{ijt}}{(1 - LR_{ikt}) * E_{irr_i}} \quad (4.15)$$

O **custo da água anual**,  $Ca_{ijklt}$ , em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte/sistema de bombeamento, pode ser obtido por:

$$Ca_{ijklt} = Pra_k * Q_{irr_{ijkt}} * Ac_{ijkl} \quad (4.16)$$

onde:

$Pra_k$  - preço atual da água em R\$/m<sup>3</sup> retirada da fonte k.

$Ac_{ijkl}$  - Área plantada com a cultura i na unidade de produção j com água aduzida da fonte k pelo sistema de bombas l.

$Qirr_{ijkt}$  - lâmina mensal de água para a irrigação da cultura i da unidade de produção j com água aduzida da fonte k durante o mês t.

O custo anual de bombeamento de água,  $Cb_{ijkl}$  em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte/sistema de bombeamento, pode ser dado por:

$$Cb_{ijkl} = \frac{0.02726 * Prb_l * \Delta H_{ijkt} * Qirr_{ijkt} * Ac_{ijkl}}{\eta_l} \quad (4.17)$$

onde:

$Prb_l$  - Preço do Kwh para o sistema de bombeamento l,

$\Delta H_{ijkt}$  - requerimento de pressão do sistema de bombeamento l considerando as cotas da unidade de produção j, a cota da fonte k e o requerimento de pressão do sistema de irrigação, em metros de coluna de água (mca),

$\eta_l$  - eficiência do sistema l de bombeamento

$$\Delta H_{ijkt} = (H_j - H_k) * (1 - H_{SI\%oi} / 100) + H_{SIi} + Hprof_{kt} \quad (4.18)$$

onde:

$H_j$  - cota da unidade de produção j (m)

$H_k$  - cota da parte térrea da fonte k (m)

$Hprof_{kt}$  - profundidade mensal para adução de água da fonte k (m)

$H_{SIi}$  - requerimento de pressão do sistema de irrigação da cultura i

$H_{SI\%oi}$  - perda de carga percentual do sistema de irrigação i para elevação de 1 m de coluna d'água

Outros custos importantes que devem ser analisados durante um processo decisório são os custos de implantação e manutenção dos sistemas de irrigação, de bombeamento, de fontes e canais ( $Cs_{ijkl}$ ):

$$Cs_{ijkl} = Csi_{ijkl} + Csb_{ijkl} + Csf_{ijkl} + Csc_{ijkl} \quad (4.19)$$

onde:

$Csi_{ijkl}$  - custo de implantação e manutenção do sistema de irrigação, em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte/sistema de bombeamento, dado por:

$$Csi_{ijkl} = \left( \frac{txsi_i * (1 + txsi_i)^{tvusi_i}}{(1 + txsi_i)^{tvusi_i} - 1} Pisi_i + Pmsi_i \right) * Ac_{ijkl} \quad (4.20)$$

$Pisi_i$  - custo de implantação por unidade de área do sistema de irrigação para a cultura i em R\$/ha

$Pmsi_i$  - custo de manutenção por unidade de área do sistema de irrigação para a cultura i em R\$/ha

$tvusi_i$  - tempo de vida útil do sistema de irrigação para a cultura i em anos

$txsi_i$  - taxa anual de amortização do investimento para o sistema de irrigação

$Csb_{ijkl}$  - custo de implantação e manutenção de um sistema de bombeamento, em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte/sistema de bombeamento, dado por:

$$Csb_{ijkl} = \left( \frac{txsb_l * (1 + txsb_l)^{tvusb_l}}{(1 + txsb_l)^{tvusb_l} - 1} Pish_l + Pmsb_l \right) * \frac{Q_{irrijkl} * Ac_{ijkl}}{\sum_i^{nc} \sum_j^{nn} \sum_k^{nf} Q_{irrijkl} * Ac_{ijkl}} \quad (4.21)$$

$Pish_l$  - custo de implantação do sistema de bombeamento l em R\$

$Pmsb_l$  - custo de manutenção do sistema de bombeamento l em R\$

$tvusb_l$  - tempo de vida útil do sistema de bombeamento l em anos

$txsb_l$  - taxa anual de amortização do investimento para o sistema de bombeamento l

$Ac_{ijkl}$  - ótima área alocada por cultura/unidade de produção/fonte/sistema de bombeamento

$Csf_{ijkl}$  - custo de construção/implantação e manutenção de fontes, em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte/sistema de bombeamento, dado por:

$$Csf_{ijkl} = \left( \frac{txsf_k * (1 + txsf_k)^{tvusf_k}}{(1 + txsf_k)^{tvusf_k} - 1} Pisfk + Pmsfk \right) * \frac{Q_{irrijkl} * Ac_{ijkl}}{\sum_i^{nc} \sum_j^{nn} \sum_l^{nb} Q_{irrijkl} * Ac_{ijkl}} \quad (4.22)$$

$Pisfk$  - custo de implantação da fonte k em R\$

$P_{imf_k}$  - custo de manutenção da fonte k em R\$

$tvusf_{kl}$  - tempo de vida útil da fonte k em anos

$txsf_k$  - taxa anual de amortização do investimento para o sistema de fontes k

$C_{SC_{ijklt}}$  - custo de construção/implantação e manutenção de canais, em R\$/ano/cultura/unidade de produção/fonte/sistema de bombeamento, dado por:

$$C_{SC_{ijklt}} = \left( \frac{txsc_m * (1 + txsc_m)^{tvusc_m}}{(1 + txsc_m)^{tvusc_m} - 1} P_{isc_m} + P_{msc_m} \right) * \frac{Q_{irr_{ijklt}} * Ac_{ijkl}}{\sum_i^{nc} \sum_j^{nn} \sum_l^{nb} Q_{irr_{ijklt}} * Ac_{ijkl}} \quad (4.23)$$

$P_{isc_m}$  - custo de implantação de canais m ∈ a fonte k em R\$

$P_{msc_m}$  - custo de manutenção do sistema de canais m ∈ a fonte k em R\$

$tvusc_m$  - tempo de vida útil do sistema de canais m ∈ a fonte k em R\$

$txsc_m$  - taxa anual de amortização do investimento para o sistema de canais ∈ a fonte k

Neste trabalho foi considerado o custo de investimento de implantação dos sistemas de irrigação.

Outros custos, como por exemplo os gastos fixos e indiretos dos fazendeiros (administração, taxas, etc.), não alteram o resultado do processo de otimização e não são levados em consideração na solução do problema.

#### 4.2.2 – Maximização da mão de obra

A segunda função objetivo é a maximização da mão de obra, expressa pela seguinte equação

$$MO = \sum_{i=1}^{nc} \sum_{t=1}^{na} Hdc_{it} * Ac_{ijkl} \quad (4.24)$$

onde:

t - ano, t = 1, ..., na

na - número de anos em estudo

$i$  – tipo de cultura,  $i=1, 2, \dots, n_c$

$n_c$  - número de culturas irrigadas

$Hdc_i$  - número de diárias por hectare/(ano x cultura)

$Ac_{ijkl}$  - área plantada com a cultura  $i$  na unidade de produção  $j$  com água retirada da fonte  $k$  pelo sistema de bombas  $l$

### 4.3 – EQUAÇÕES DE RESTRIÇÕES DO MODELO

As funções objetivo descritas anteriormente, estão sujeitas as equações de restrições do problema, que se referem aos seguintes aspectos:

a) *limites das áreas máximas e mínimas a serem plantadas de cada cultura por unidade de produção:*

$$Amin_{ij} \leq \sum_k^{nf} \sum_l^{nb} Ac_{ijkl} \leq Amax_{ij} \tag{4.25}$$

onde:

$Amin_{ij}$  - área mínima plantada com a cultura  $i$  na unidade de produção  $j$ . em ha

$Amax_{ij}$  - área máxima plantada com a cultura  $i$  na unidade de produção  $j$  em ha

*ou por perímetro:*

$$Amin_{ip} \leq \sum_{j \in P}^{nn} \sum_k^{nf} \sum_l^{nb} Ac_{ijkl} \leq Amax_{ip} \tag{4.26}$$

onde:

$P$  - é o conjunto de unidades de produção pertencentes ao perímetro  $p$  ( $j \in P$ )

$Amin_{ip}$  - área mínima plantada com a cultura  $i$  no perímetro  $p$  ( $j \in P$ ) em ha

$Amax_{ip}$  - área máxima plantada com a cultura  $i$  no perímetro  $p$  ( $j \in P$ ) em ha

b) *limite máximo mensal da área total que pode ser plantada por unidade de produção em cada mês:*

$$\sum_i^{nc} \sum_k^{nf} \sum_l^{nb} a_{ij} * Ac_{ijkl} \leq Atot_{jt} \quad (4.27)$$

onde:

$\alpha_{it} =$  1 se a cultura i é plantada no mês t  
0 se a cultura i não é plantada no mês t

$Atot_{jt}$  – máxima área que pode ser plantada na unidade de produção j no mês t em ha

ou por perímetro:

$$\sum_i^{nc} \sum_{j \in P}^{nn} \sum_k^{nf} \sum_l^{nb} a_{ij} * Ac_{ijkl} \leq Atot_{pt} \quad (4.28)$$

onde:

$Atot_{pt}$  - máxima área que pode ser plantada no perímetro p ( $j \in P$ ) no mês t em ha

c) não negatividade das variáveis

$$Ac_{ijkl} \geq 0, \quad Vext_t \geq 0 \text{ e } \quad Vdef_t \geq 0 \quad (4.29)$$

onde:

$Vext_t$  - Vazão vertida pelo extravasor do reservatório no mês t em m<sup>3</sup>/mês

$Vdef_t$  - Vazão descarregada do reservatório no mês t em m<sup>3</sup>/mês

d) operação do reservatório e restrições físicas:

O balanço hídrico mensal do reservatório, que é baseado no princípio de conservação da massa, determina a variação mensal do volume armazenado do reservatório e pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Vr_{t+1} = Vr_t + Qa_t - Qd_t + 10 * \left\{ (Pr_t - Evr_t) * \frac{(Ar_t + Ar_{t+1})}{2} - \sum_i^{nc} \sum_{j \in R}^{nn} \sum_{k \in R}^{nf} \sum_l^{nb} Qirr_{ijkl} * Ac_{ijkl} \right\} - Vext_t - Vdef_t \quad (4.30)$$

onde:

R - Conjunto de todos canais (fonte  $k \in R$ ) que aduzem água diretamente do reservatório

$Vr_t$  - Volume do reservatório no mês t em m<sup>3</sup>,

- $V_{r_{t+1}}$  - Volume do reservatório no mês t+1 em  $m^3$ ,  
 $Q_{a_t}$  - Vazão afluyente ao reservatório no mês t em  $m^3/mês$ ,  
 $Q_{d_t}$  - Vazão defluente do reservatório no mês t em  $m^3/mês$ ,  
 $V_{ext_t}$  - Vazão vertida pelo extravasor do reservatório no mês t em  $m^3/mês$ ,  
 $V_{def_t}$  - Vazão descarregada do reservatório no mês t em  $m^3/mês$ ,  
 $P_{r_t}$  - Precipitação durante o mês t na área do reservatório em mm/mês,  
 $E_{v_r_t}$  - Taxa de evaporação mensal na região do reservatório em mm/mês,  
 $A_{r_t}$  - Área média mensal do espelho de água do reservatório em ha.

A área do espelho de água do reservatório pode ser relacionada com o volume do reservatório naquele mês, pela seguinte equação:

$$A_{r_t} = km * V_{r_t}^{mm} \quad (4.31)$$

onde:

mm - expoente da equação obtido através de ajuste de curva cota x volume x área

km - coeficiente da equação obtido através de ajuste de curva cota x volume x área

Com relação ao reservatório, o seu volume deverá estar limitado pela sua capacidade máxima e requerimentos quanto ao volume mínimo, ou seja:

$$V_{r_{min_t}} \leq V_{r_t} \leq V_{r_{max_t}} \quad (4.32)$$

onde:

$V_{r_{max_t}}$  - volume máximo admitido para o reservatório no mês t ( $m^3$ ) e

$V_{r_{min_t}}$  - volume mínimo admitido para o reservatório no mês t ( $m^3$ ).

Para garantir a sustentabilidade hídrica do sistema, se faz necessário que o reservatório apresente o seu volume final igual ou maior que o seu volume inicial, logo esta restrição é incorporada ao problema, estabelecendo que o volume mínimo do último mês de simulação será igual ou maior que o volume inicial:

$$V_{r_{min_t}} \geq V_{ini} \quad (4.33)$$

onde:

$V_{ini}$  - volume inicial admitido para o reservatório ( $m^3$ )

O limite máximo da capacidade de extravasamento do reservatório é dado por:

$$V_{ext,t} \leq V_{ext\ max} \quad (4.34)$$

onde:

$V_{ext\ max}$  – é o limite máximo da capacidade do extravasor em m<sup>3</sup>/mês, de acordo com o seu formato

No caso de existência de descarregador de fundo, as restrições quanto ao seu comportamento físico é dado por:

$$V_{def,t} \leq V_{def\ max} \quad (4.35)$$

onde:

$V_{def\ max}$  – limite máximo da vazão descarregada do reservatório no mês t em m<sup>3</sup>/mês

Os limites de vazão máximo ( $V_{reg\ max}$ ) e mínimo (regularizada mensal:  $V_{reg\ min,t}$ ) da calha do rio pode ser dada por:

$$V_{def,t} + V_{ext,t} \leq V_{reg\ max} \quad (4.36)$$

A restrição quanto a capacidade de transporte de água pelo canal  $k \in T$  pode ser dada por:

$$\sum_j^{nn} \sum_i^{nc} \sum_l^{nb} Q_{irr,ijkt} * A_{c,ijkl} \leq V_{can\ max_{k \in T}} \quad (4.37)$$

onde:

$V_{can\ max_k}$  – capacidade de vazão do k-ésimo canal pertencente a T

#### e) disponibilidade de água subterrânea

Os limites impostos pela capacidade máxima de vazão mensal que pode ser retirada do lençol freático através do sistema de bombeamento dos poços, é dado por:

$$10 * \sum_i^{nc} \sum_j^{nn} \sum_{k \in M}^{nf} \sum_l^{nb} Q_{irr,ijkt} * A_{c,ijkl} \leq V_{lf\ max_{mt}} \quad (4.38)$$

onde:

M - conjunto de poços ligados ao m-ésimo lençol freático

$V_{lf\ max_{mt}}$  - vazão máxima mensal suportada pela soma do volume de água retirado dos poços  $k \in M$  em m<sup>3</sup>/mês



Cada poço está associado a uma restrição quanto a sua capacidade mensal de vazão, que pode ser dada por:

$$10 * \sum_j^{nn} \sum_i^{nc} \sum_l^{nb} Q_{irr_{ijkl}} * Ac_{ijkl} \leq Vp_{max_k}, \quad k \in N \quad (4.39)$$

onde..

N - conjunto de fontes k do tipo poços

Vpmax<sub>k</sub> - vazão máxima mensal de cada poço k ∈ N, em m<sup>3</sup>/mês.

#### f) limitações do sistema de bombeamento

A limitação imposta pela capacidade do sistema de bombeamento, poder dada por:

$$10 * \sum_j^{nn} \sum_i^{nc} \sum_k^{nf} Q_{irr_{ijkl}} * Ac_{ijkl} \leq Vb_{max_l} \quad (4.40)$$

onde:

Vbmax<sub>l</sub> - capacidade máxima mensal de vazão do l-ésimo sistema de bombeamento em m<sup>3</sup>/mês.

Para se estabelecer os limites superiores da capacidade de vazão para cada sistema l de bombeamento, calcula-se esta vazão máxima com os dados dos conjuntos locais de bombas, como é mostrado a seguir:

$$Vb_{max_l} = 3,6 * nh_l * Vb_{cap_l} \quad (4.41)$$

onde:

nh<sub>l</sub> - número de bombas em cada conjunto l, com iguais capacidades de elevação de altura manométrica da água e vazão,

nh<sub>l</sub> - número de horas mensais médio de trabalho do sistema l de bombas, e

Vb<sub>cap<sub>l</sub></sub> - vazão mensal média aduzida de cada bomba no conjunto de bombas l, em l/s.

Ainda com relação ao sistema de bombeamento deve-se observar que as necessidades de altura sucção da fonte k e recalque que as diferenças de cotas de unidades de produção j e fonte k, aliados ao requerimento de pressão do sistema de irrigação associado a cultura i requer para o seu sistema de irrigação no nível k devem ser, necessariamente, satisfeitas pelos conjuntos de bombas. O requerimento de sucção pode ser dado por:

$$H_{prof_{kt}} \leq H_{bprof_l} \quad (4.42)$$

onde:

$H_{prof_{kt}}$  - profundidade para aduzir a água da fonte  $k \in N$  no mês  $t$  (em m),

$H_{bprof_l}$  - altura máxima de sucção do sistema de bombeamento  $l$  (em m).

A altura de recalque que a bomba tem que satisfazer pode ser dada por (vide Eq. 4.18):

$$(H_j - H_k) * (1 - H_{sl\%} / 100) + H_{sl} \leq H_{brec_l} \quad (4.43)$$

onde:

$H_{brec_l}$  - altura máxima de recalque do sistema de bombeamento  $l$  (em m)

#### 4.4 – DADOS DE ENTRADA DO MODELO CISDERGO

a) Dados relacionados ao reservatório

$nm$  = número de meses em estudo

- *Dados Climatológicos*

$Pr$  = Precipitação média mensal na área do reservatório (mm/mês)

$Evr$  = Evaporação média mensal do tanque na área do reservatório (mm/mês)

$Kt$  = Coeficiente de evaporação do tanque

- *Fluxo de água*

$Qa$  = Vazão mensal afluyente ao reservatório ( $m^3/mês$ )

$Qd$  = Vazão média mensal defluente (demanda) do reservatório para abastecer as cidades de Condado e Malta ( $m^3/mês$ )

$Vini$  = Volume inicial do reservatório no processo iterativo

- *Dados Estruturais*

$Vrmax$  = Volumes mensais máximos do reservatório ( $m^3$ )

$Vrmin$  = Volumes mensais mínimos do reservatório ( $m^3$ )

- *Capacidade de armazenamento do reservatório*

$Vextmax$  = Vazão extravasada máxima permitida pelo extravasor do reservatório

$Km$  e  $mm$  = Dados dos coeficientes da relação Área x Volume do reservatório:

$$Ar(i) = Km * Vr(i)^{mm}$$

$V_{canmax}$  = Capacidade máxima do canal para aduzir água do reservatório para a área irrigada ( $m^3/mês$ )

$Pra$  = Preço médio do  $m^3$  de água retirada do reservatório para o sistema de irrigação ( $\$/m^3$ )

b) Dados relacionados ao lençol freático

$np$  = Número de poços

$Hk$  = Cota da parte térrea do poço (m)

$Hprof$  = Profundidade para extrair água do poço (m)

$V_{pmáx}$  = Capacidade de extração de água dos poços no mês ( $m^3/s$ )

$Pra$  = Preço da água extraída ( $\$/m^3$ )

$Csf$  = Custo anual de implantação e manutenção do poço (R\$/ano)

$tvusf$  = Vida útil do poço (anos)

$txsf$  = Taxa anual de amortização do investimento

$Vl_{fmax}$  = Capacidade mensal máxima de exploração do lençol freático ( $m^3/mês$ )

c) Custo e capacidade do sistema de bombeamento

$nb$  = Número de sistemas de bombeamento para uso geral (reservatórios e poços)

$nb$  = Número de bombas em cada tipo de sistema de bombas

$V_{bcap}$  = Capacidade de bombeamento média (l/s)

$H_{bprof}$  = Altura máxima de elevação da coluna de água pelas bombas

$\eta$  = Rendimento do sistema moto-bomba

$Prb$  = Preço do Kwh para cada sistema de bombas (R\$/Kwh)

$Csb$  = Custo anual de implantação e manutenção do sistema (R\$/ano)

d) Dados das culturas e áreas cultiváveis

$nc$  = Número de culturas

$na$  = Número de anos em estudo

$Prod$  = Produtividade de cada cultura em cada ano

$Prc$  = Preço médio unitário de venda de cada cultura

$Cp$  = Custo médio de produção de cada cultura em R\$/ha (insumos: sem energia)

elétrica e mão de obra) pela Conta Cultural do Banco do Nordeste

e) Dados sobre o perímetro irrigado e restrição quanto as áreas

$A_{tot}$  = Área total mensal disponível para ser plantada (ha)

$A_{max}$  = Área máxima total que pode ser plantada com cada cultura (ha)

$A_{min}$  = Área mínima que pode ser plantada com cada cultura (ha)

- *Dados das unidades de produção*

$nn$  = Número de unidades de produção aptos para irrigação

$nf$  = Fontes de Abastecimento de água para cada unidade de produção

- *Dados sobre o mercado financeiro*

$dm$  = Taxa anual de desvalorização da moeda

$dc$  = Taxa anual que reflete a expectativa de aumento ou diminuição da receita para cada cultura acima da inflação que pode ser positiva ou negativa indicando tendência de aumento ou diminuição de lucros

- *Dados Climatológicos da zona de irrigação*

$P_c$  = Precipitação média mensal na área irrigável (mm/mês)

$E_{vc}$  = Evaporação média mensal medida no tanque de evaporação na área irrigável em cada mês (mm/mês)

$K_{tc}$  = Constante de evaporação na área irrigável

*Dados do sistema de irrigação aplicados a culturas*

$E_d$  = Valor percentual da eficiência do sistema de distribuição para irrigação por cultura

$E_a$  = Valor percentual da eficiência da aplicação da irrigação por cultura

$\Delta H$  = Pressão requerida pelo sistema de irrigação da cultura (mca)

$H_{si}$  = Perda de carga percentual para elevar água em 1 m (%/m)

$C_{si}$  = Custo de implantação e custo anual de manutenção do sistema de irrigação por hectare (R\$/(ano x ha))

$tv_{usi}$  = Vida útil do sistema de irrigação (anos)

$tx_{si}$  = Taxa anual de amortização do investimento

#### 4.5 – RESULTADOS FORNECIDOS PELO MODELO

O modelo CISDERGO realiza as seguintes operações:

- Cálculo da Evaporação na área de cultura (mm/mês)
- Cálculo da Precipitação Efetiva na área irrigada
- Cálculo da Necessidade suplementar líquida da cultura
- Cálculo da Receita líquida média mensal por cultura por ha
- Cálculo do Balanço Hídrico no Reservatório
- Cálculo do volume mensal do reservatório
- Cálculo das áreas a serem irrigadas por cultura
- Cálculo do número de diárias necessárias para o cultivo das culturas

Os resultados fornecidos pelo modelo são os seguintes:

- Áreas irrigadas totais e por cultura (por nível de terreno e por fontes de abastecimento hídrico) em ha
- Receitas e benefícios líquidos totais e por cada cultura obtidos com o cultivo das culturas irrigadas
- Área cultivada total mensal por nível, em ha
- Volumes mensais extraídos das fontes (reservatório e poços) para a irrigação ( $\text{hm}^3$ )
- Áreas da superfície líquida, volumes de armazenamento e vertidos mensais do reservatório

A Figura 4.1 representa o fluxograma do modelo

Fluxograma do Modelo

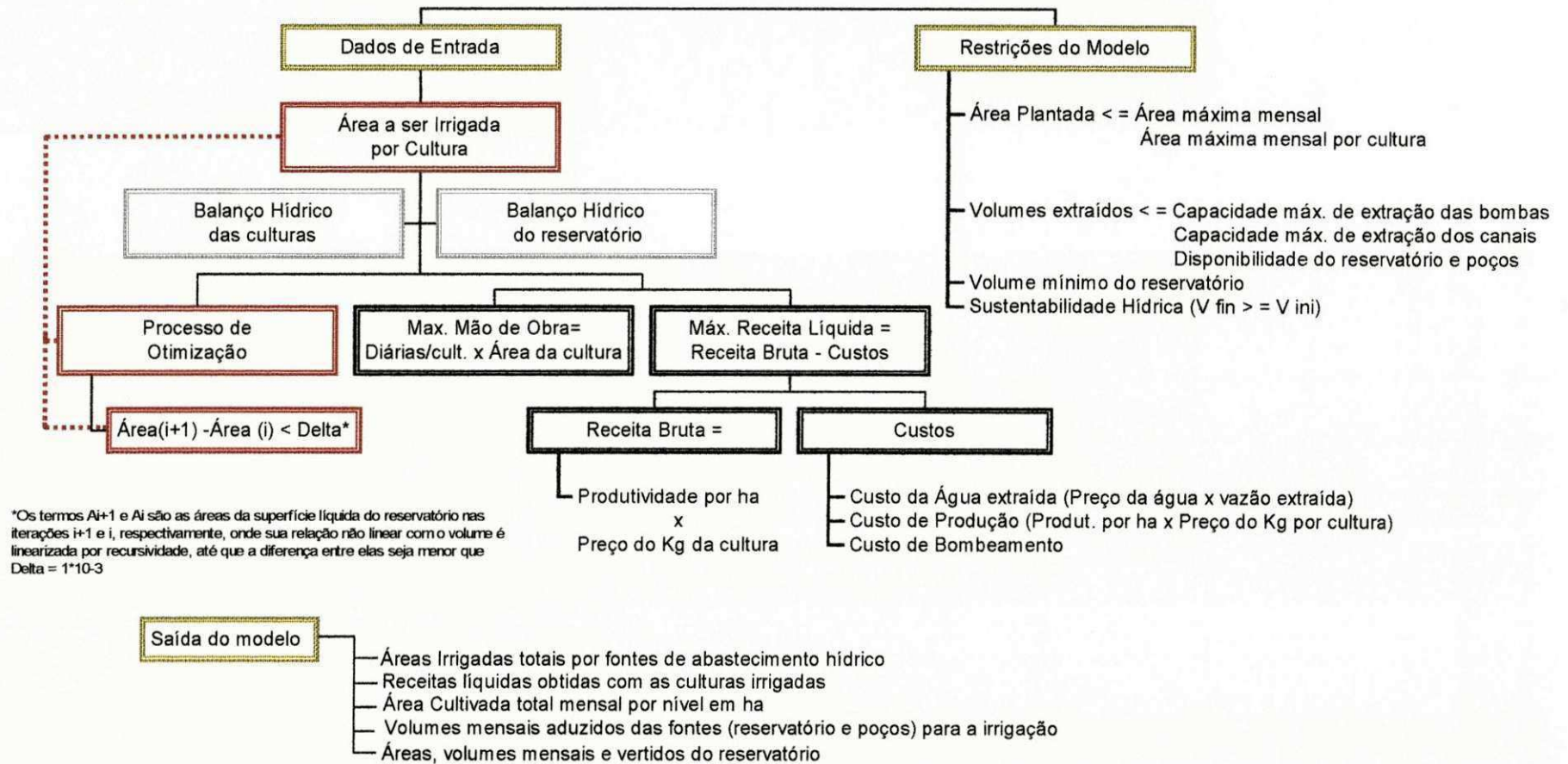


Figura 4.1 – Fluxograma do Modelo CISDERGO

## **CAPÍTULO V**

### **DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

#### **5.1 INTRODUÇÃO**

Fazendo-se uso do Modelo de Programação Linear Recursiva, o CISDERGO, realizou-se testes visando estudar as condições de operação ótima e conjunta do sistema composto pelo reservatório Engenheiro Arcoverde, Perímetro Irrigado de Condado e aquífero aluvial, sob os aspectos de comportamento do sistema e estimativas da geração de renda e de emprego.

Utilizou-se no modelo dados mensais de precipitações, vazões afluentes, vazões defluentes, etc, e adotou-se como período de estudo a série de 1973-1991 (19 anos) mostrada na Tabela 3.3 do Capítulo III. Desta série de dados mensais de pluviometria, retirou-se as médias mensais de toda a série, o ano de menor valor anual de precipitação e o ano de maior valor anual de precipitação, caracterizando assim, para efeitos de estudo, os seguintes períodos de ocorrência:

Ano médio – dados médios mensais da série histórica total (1973-1991) de precipitação.

Ano seco – ano de menor valor anual de precipitação.

Ano chuvoso – ano de maior valor anual de precipitação.

As séries de vazões afluentes ao reservatório, utilizadas para os ciclos médio, seco e chuvoso são correspondentes as usadas para os dados de precipitação.

A geração das séries sintéticas de vazões afluentes ao reservatório, pelo modelo Tank Model, foi calibrada a partir de dados observados na bacia de Emas, por não existir posto fluviométrico na região de estudo. Provavelmente em razão disto, os anos mais chuvosos geram uma vazão afluente excepcionalmente alta. Por isso, para o ciclo chuvoso, optou-se por selecionar o terceiro ano mais chuvoso como representativo deste ciclo.

Para todos os ciclos climáticos: médio, seco e chuvoso, o modelo foi rodado para cada uma das funções objetivo e para as duas em conjunto. Como já mostrado, as funções objetivo são as seguintes:

- 1 – Maximização da receita líquida com irrigação e
- 2 – Maximização da geração de emprego.

Essas funções objetivo são maximizadas em três situações diferentes, para cada um dos ciclos:

- Fazendo-se uso conjunto dos reservatórios superficial e subterrâneo
- Fazendo-se uso apenas do reservatório superficial
- Fazendo-se uso apenas do reservatório subterrâneo

Os resultados fornecidos pelo modelo são analisados em função de:

- a) Diferentes ciclos hidroclimáticos,
- b) Volumes extraídos dos reservatórios e poços,



- c) Fontes usadas na irrigação (reservatório e poços),
- d) Reduções da capacidade do aquífero,
- e) Volume inicial ótimo do reservatório com garantia de sustentabilidade hídrica para cada ciclo climático,
- f) Reduções nas vazões afluentes ao reservatório,
- g) Mudanças dos sistemas de irrigação,
- h) Alterações no plano cultural em relação a época do plantio de determinadas culturas,
- i) Alterações nos preços da água (análise de sensibilidade).

Os cenários apresentados na Tabela 5.1 traduzem a combinação dos ciclos climáticos, funções objetivo, fontes de água e demais variabilidade de condições iniciais, critérios operacionais e parâmetros do sistema.

Nestes cenários são levados em consideração:

- a) a sustentabilidade hídrica do reservatório – foi condicionado, através de uma equação de restrição, que o volume final do último mês do estudo teria que ser maior ou igual ao volume do início do estudo, garantindo assim a sustentabilidade hídrica, ou seja, a possibilidade de repetição do processo.

Para o período seco, não foi possível utilizar a mesma restrição de sustentabilidade hídrica, devido aos limites de disponibilidade deste período. Entretanto, usou-se um critério que assegurou para o reservatório um volume mínimo de 10.000.000 m<sup>3</sup> mensais.

- b) Foi considerado, para todos os cenários, um volume mínimo mensal para o reservatório de 10.000.000 m<sup>3</sup>, que não poderá ser utilizado na irrigação como medida de garantia para períodos de estiagem, já que o reservatório também abastece os municípios de Condado e Malta.

- c) O período para a otimização da seleção das culturas adotado para o cenário C5 é de 2, 3, 4 e 5 anos e para os demais cenários, o período é de 1 ano e é assumido que a irrigação poderá se iniciar no mês de janeiro.

Tabela 5.1 – Cenários das simulações realizados

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
Ciclos Climáticos	Médio, Seco Chuvoso	Médio, Seco Chuvoso	Médio, Seco Chuvoso	Médio, Seco Chuvoso	Seco	Seco	Médio	Médio, Seco Chuvoso	Médio, Seco Chuvoso	Médio	Médio, Seco Chuvoso	Médio	Médio, Seco Chuvoso
Função Objetivo	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1
Fontes de Abastecimento	A e B	A e B	A	C	A	A	A	A e C	A, B e C	A	A	A	A
Volume inicial	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	Ótimo	17 milhões	17 milhões
Vazão Afluente	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Reduzida	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Mudança do sistema de Irrig.	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Modificado	Padrão
Preço da água	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Variado
Plano cultural	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Modificado	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Capacidade do Aquífero	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Reduzido	Reduzido	Padrão	Padrão e Reduzido	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Horas de bombeamento	8	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Área Máxima a ser plantada	Padrão	Padrão	Reduzido	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
No. de anos de estudo	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano a 5 anos	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano

A = fonte: reservatório e poços; B = fonte: reservatório; C = fonte: poços

1 = maximização da receita líquida, 2 = maximização da mão de obra, 3 = ponderação das funções objetivo 1 e 2

Ano seco – ano de menor valor anual de precipitação.

Ano chuvoso – ano de maior valor anual de precipitação.

As séries de vazões afluentes ao reservatório, utilizadas para os ciclos médio, seco e chuvoso são correspondentes as usadas para os dados de precipitação.

A geração das séries sintéticas de vazões afluentes ao reservatório, pelo modelo Tank Model, foi calibrada a partir de dados observados na bacia de Emas, por não existir posto fluviométrico na região de estudo. Provavelmente em razão disto, os anos mais chuvosos geram uma vazão afluente excepcionalmente alta. Por isso, para o ciclo chuvoso, optou-se por selecionar o terceiro ano mais chuvoso como representativo deste ciclo.

Para todos os ciclos climáticos: médio, seco e chuvoso, o modelo foi rodado para cada uma das funções objetivo e para as duas em conjunto. Como já mostrado, as funções objetivo são as seguintes:

- 1 – Maximização da receita líquida com irrigação e
- 2 – Maximização da geração de emprego.

Essas funções objetivo são maximizadas em três situações diferentes, para cada um dos ciclos:

- Fazendo-se uso conjunto dos reservatórios superficial e subterrâneo
- Fazendo-se uso apenas do reservatório superficial
- Fazendo-se uso apenas do reservatório subterrâneo

Os resultados fornecidos pelo modelo são analisados em função de:

- a) Diferentes ciclos hidroclimáticos,
- b) Volumes extraídos dos reservatórios e poços,

- c) Fontes usadas na irrigação (reservatório e poços),
- d) Reduções da capacidade do aquífero,
- e) Volume inicial ótimo do reservatório com garantia de sustentabilidade hídrica para cada ciclo climático,
- f) Reduções nas vazões afluentes ao reservatório,
- g) Mudanças dos sistemas de irrigação,
- h) Alterações no plano cultural em relação a época do plantio de determinadas culturas,
- i) Alterações nos preços da água (análise de sensibilidade).

Os cenários apresentados na Tabela 5.1 traduzem a combinação dos ciclos climáticos, funções objetivo, fontes de água e demais variabilidade de condições iniciais, critérios operacionais e parâmetros do sistema.

Nestes cenários são levados em consideração:

- a) a sustentabilidade hídrica do reservatório – foi condicionado, através de uma equação de restrição, que o volume final do último mês do estudo teria que ser maior ou igual ao volume do início do estudo, garantindo assim a sustentabilidade hídrica, ou seja, a possibilidade de repetição do processo.

Para o período seco, não foi possível utilizar a mesma restrição de sustentabilidade hídrica, devido aos limites de disponibilidade deste período. Entretanto, usou-se um critério que assegurou para o reservatório um volume mínimo de 10.000.000 m<sup>3</sup> mensais.

- b) Foi considerado, para todos os cenários, um volume mínimo mensal para o reservatório de 10.000.000 m<sup>3</sup>, que não poderá ser utilizado na irrigação como medida de garantia para períodos de estiagem, já que o reservatório também abastece os municípios de Condado e Malta.

- c) O período para a otimização da seleção das culturas adotado para o cenário C5 é de 2, 3, 4 e 5 anos e para os demais cenários, o período é de 1 ano e é assumido que a irrigação poderá se iniciar no mês de janeiro.

Tabela 5.1 – Cenários das simulações realizados

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
Ciclos Climáticos	Médio, Seco Chuvoso	Médio, Seco Chuvoso	Médio, Seco Chuvoso	Médio, Seco Chuvoso	Seco	Seco	Médio	Médio, Seco Chuvoso	Médio, Seco Chuvoso	Médio	Médio, Seco Chuvoso	Médio	Médio, Seco Chuvoso
Função Objetivo	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1
Fontes de Abastecimento	A e B	A e B	A	C	A	A	A	A e C	A, B e C	A	A	A	A
Volume inicial	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	17 milhões	Ótimo	17 milhões	17 milhões
Vazão Afluente	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Reduzida	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Mudança do sistema de Irrig.	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Modificado	Padrão
Preço da água	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Variado
Plano cultural	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Modificado	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Capacidade do Aquífero	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Reduzido	Reduzido	Padrão	Padrão e Reduzido	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Horas de bombeamento	8	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Área Máxima a ser plantada	Padrão	Padrão	Reduzido	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
No. de anos de estudo	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano a 5 anos	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano

A = fonte: reservatório e poços; B = fonte: reservatório; C = fonte: poços

1 = maximização da receita líquida, 2 = maximização da mão de obra, 3 = ponderação das funções objetivo 1 e 2

Para um melhor entendimento das situações analisadas, os cenários com suas respectivas denominações serão detalhados logo abaixo:

### *Cenários C1*

Este cenário tem por objetivo observar o comportamento do sistema para os diferentes ciclos: médio, seco, e chuvoso, onde a otimização foi realizada fazendo-se uso conjunto dos reservatórios superficiais e subterrâneos. O cenário C1-A, que capta água do reservatório e poços servirá de comparação para os resultados obtidos com o cenário C1-B, que aduz água apenas do reservatório. Através dos cenários C1-A e C1-B é verificado o quanto é variável a receita líquida auferida pelo perímetro quando sujeito a variações de fontes de abastecimentos. Aqui são consideradas 16 culturas, entre culturas perenes e semi-perenes, que já estão implantadas no perímetro e o modelo fornece as áreas por culturas que dão o melhor retorno financeiro.

Os dados necessários para este cenário foram melhor detalhados no Capítulo III, denominado Características e Dados Hidroclimáticos do Sistema em Estudo. A grande maioria destes dados serviram também para outros cenários. Os dados de entrada são os seguintes:

#### *a) Referentes ao reservatório*

➤ As tabelas abaixo mostram os valores médios mensais de pluviometria e vazão referentes aos ciclos: médio, seco e chuvoso.

Tabela 5.2 – Valores médios mensais de precipitação e vazão afluyente ao reservatório Engenheiro Arcoverde (ciclo médio)

	jan	fev	mar	abril	mai	jun	jul	agost	set	out	nov	dez
Prec. (mm/mês)	69,2	143,5	209,7	215,2	74,4	32,6	25,7	9,5	7,8	15,3	15,5	31,5
Q (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês)	1106	3284	4935	5701	1359	314	227	9,1	0	89,4	59,4	306



Tabela 5.3 – Valores mensais de precipitação e de vazão afluente ao reservatório que caracteriza o ano seco(1983)

	jan	fev	mar	abril	mai	jun	jul	agost	set	out	nov	dez
Prec. (mm/mês)	34.7	103.1	136.6	48.3	14.6	11.4	8.4	9.5	8.1	13.4	4.9	9.8
Q (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês)	0	186	1004.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 5.4 - Valores mensais de precipitação e de vazão afluente ao reservatório que caracteriza o ano chuvoso (1985)

	jan	fev	mar	abril	mai	jun	jul	agost	set	out	nov	dez
Prec. (mm/mês)	64.1	286.2	294.3	252.9	117.4	29.6	60	4.4	0.1	2.1	3.4	24.6
Q (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /mês)	0	4687.2	4885.6	4526	1178	0	0	0	0	0	0	0

➤ Vazão média mensal defluente do reservatório (m<sup>3</sup>/mês), que corresponde as vazões que saem do reservatório para suprir as demandas dos municípios de Condado e Malta, totalizando 36.000 m<sup>3</sup>/mês, conforme descrito no Capítulo III.

➤ Evaporação média mensal do Tanque Classe A na área do reservatório (mm/mês)

Tabela 5.5 – Dados de Evaporação em mm

mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Evap	216,8	157	128	122	109	144	161	205	225,8	260	212,7	222,8

➤ Coeficiente de evaporação do Tanque Classe A= 0,75

➤ Volume inicial do reservatório no processo iterativo (m<sup>3</sup>) = 17.000.000 m<sup>3</sup>. Este volume foi adotado por corresponder a 50% da capacidade máxima do reservatório.

➤ Volumes mensais máximos do reservatório = 35.000.000 m<sup>3</sup>, que é a capacidade máxima de armazenamento do reservatório.

➤ Volumes mensais mínimos do reservatório = 10.000.000 m<sup>3</sup>, adotado para servir de reserva, em caso de dois anos consecutivos de seca, tendo em vista que o reservatório abastece dois municípios.

➤ Vazão extravasada máxima permitida pelo extravasor do reservatório =  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

➤ Vazão máxima para a calha do rio =  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

➤ Coeficientes da relação área x volume do reservatório:  $A_r(i) = K_m \cdot V_r(i)^{mm}$ , obtidos através do programa Ajuste desenvolvido em 1999, pelo professor Wilton Pereira da Silva do Departamento de Física da Universidade Federal da Paraíba - Campus II, que ajusta os pontos de funções lineares, linearizáveis e não lineares:  $K_m = 83,6$  e  $mm = 0,637$ .  $A(i)$  é a área da superfície líquida do reservatório no mês  $i$  e  $V_r(i)$  é o volume do reservatório no mês  $i$ .

➤ Capacidade máxima do canal para aduzir água do reservatório para a área irrigada =  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

➤ O custo de manutenção e implantação do canal, bem como a taxa anual de amortização do investimento foram considerados igual a zero.

➤ Preço da água aduzido do reservatório =  $0,01209 \text{ (R\$/m}^3\text{)}$  (Cobrado pelo DNOCS aos irrigantes).

#### *b) Dados referentes ao lençol freático e poços*

➤ Volume máximo possível de ser extraído do lençol freático =  $100.000 \text{ m}^3/\text{mês}$ , de acordo com estudos feitos por Rêgo e Albuquerque (1999) e para os cenários C5 e C6, o volume será reduzido para  $23.000 \text{ m}^3/\text{mês}$ . O item 3.2.5 do Capítulo III apresenta o estudo feito no aquífero aluvial de Condado.

➤ Número de poços = 72

➤ Custo de implantação e manutenção dos poços e a taxa anual de amortização do investimento foram considerados igual a zero.

➤ Preço médio do  $\text{m}^3$  de água extraído dos poços para o sistema de irrigação foi adotado igual a zero por não ter custo para os irrigantes.

➤ Capacidade de extração de água dos poços por mês =  $0,038 \text{ m}^3/\text{s}$ .

*c) Dados referentes ao sistema de bombeamento*

- Número do sistema de bombeamento para uso geral (reservatório e poços) = 4
- Número de horas diárias de bombeamento = 8 horas para o cenário C1 e para os demais 20 horas.
- Preço médio do kwh para extrair água dos poços para cada sistema = 0,07 (R\$/kwh).
- Custo de implantação e manutenção do sistema motobomba e a taxa anual de amortização do investimento foram considerados iguais a zero.
- A Tabela 5.6 mostra os tipos de sistemas de bombas, o número de bombas por sistema, suas capacidades de bombeamento, a altura de recalque mais sucção e o rendimento do sistema:

Tabela 5.6 – Características do Sistema de Bombeamento:

Tipos de Sistemas de bombas	Nº. de bombas	Capacidade de Bombeamento (l/s)	Altura de Recalque mais Sucção (m)	Rendimento do Sistema (%)
7,5 CV	20	4,16	65	70
10 CV	20	5,56	83	70
12,5 CV	20	6,94	94	70
15 CV	12	8,33	107	70

*d) Dados referentes as culturas*

- A Tabela 5.7 corresponde as culturas selecionadas e suas áreas máximas de cultivo em ha.

Tabela 5.7 - Culturas e áreas máximas plantadas em ha

cultura	Área (ha)
banana	60
tomate safra	60
tomate entressafra	60
goiaba	40
melancia safra	40
melancia entressafra	40
melão safra	40
melão entressafra	40
feijão safra	80
feijão entressafra	80
milho safra	60
milho entressafra	60
algodão safra	40
algodão entressafra	40
arroz safra	40
arroz entressafra	40

- Área total mensal a ser plantada (ha) em cada mês e o limite máximo = 230 ha
- Área mínima plantada por cultura igual a zero.
- As Tabelas 5.8 e 5.9 referem-se, respectivamente, a distribuição de plantações mensais, ou seja, o plano cultural e aos coeficientes de cultivo mensais, dado o seu estágio de desenvolvimento naquele mês.

Tabela 5.8 – Plano cultural anual

Culturas	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
banana	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
tomate safra		x	x	x	x							
tomate entressafra								x	x	x	x	
goiaba	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
melancia safra		x	x	x								
melancia entressafra								x	x	x		
melão safra		x	x	x								
melão entressafra								x	x	x		
feijão safra		x	x	x								
feijão entressafra								x	x	x		
milho safra		x	x	x	x							
milho entressafra								x	x	x	x	
algodão safra		x	x	x	x							
algodão entressafra								x	x	x	x	
arroz safra		x	x	x	x							
arroz entressafra								x	x	x	x	

Tabela 5.9 - Coeficiente de cultivo das culturas

Culturas	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Banana	0,70	0,70	0,70	0,90	0,90	0,90	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Tomate		0,50	0,75	1,15	0,80			0,45	0,75	1,15	0,80	
Goiaba	0,45	0,45	0,45	0,70	0,70	0,70	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70	0,70
Melão		0,70	1,00	0,75				0,70	1,00	0,75		
Melancia		0,70	1,00	0,75				0,70	1,00	0,75		
Feijão		0,70	1,10	0,90				0,70	1,10	0,90		
Milho		0,40	0,80	1,15				0,40	0,80	1,15		
Algodão		0,50	0,75	1,15	0,75			0,50	0,75	1,15	0,75	
Arroz		1,10	1,10	1,10	0,95			1,10	1,10	1,10	0,95	

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979) e Gomes (1999)

➤ A Tabela 5.10 mostra a Produtividade de cada cultura em cada ano em Kg/ha e a Tabela 5.11 mostra o custo médio de produção de cada cultura em R\$/ha (insumos: sem energia elétrica) pela Conta Cultura do Banco do Nordeste (Banco do Nordeste, 1997). Para todos os cenários é considerado que as culturas perenes encontram-se implantadas no perímetro.

Tabela 5.10 - Produção das culturas em Kg/ha para o período considerado

Culturas	Produção (Kg/ha)
Banana	60.000
Tomate	40.000
Goiaba	20.000
Melancia	30.000
Melão	30.000
Feijão	1.500
Milho	6.000
Algodão	3.000
Arroz	10.000

Fonte: Banco do Nordeste (1997)

Tabela 5.11 - Custo para produção de cada cultura em R\$/ha para o período considerado

Culturas	Custo de Produção (R\$/ha)
Banana	3890,31
Tomate	2656,58
Goiaba	1412,02
Melancia	1676,03
Melão	1848,96
Feijão	642,87
Milho	842,72
Algodão	982,49
Arroz	977,12

Fonte: Banco do Nordeste (1997)

- Preço médio unitário de venda de cada cultura (Tabela 5.12)

Tabela 5.12 – Preço médio unitário da cultura (R\$/Kg)

cultura	Preço (R\$/Kg)
banana	0,32
tomate safra	0,25
tomate entressafra	0,35
goiaba	0,27
melancia safra	0,2
melancia entressafra	0,28
melão safra	0,5
melão entressafra	0,5
feijão safra	0,95
feijão entressafra	1,33
milho safra	0,24
milho entressafra	0,34
algodão safra	0,57
algodão entressafra	0,78
arroz safra	0,33
arroz entressafra	0,46

Fonte: Cunha (1999)

- Taxa anual de desvalorização da moeda igual a zero.

➤ Taxa anual que reflete a expectativa de aumento ou diminuição da receita para cada cultura acima da inflação que pode ser positiva ou negativa indicando tendência de aumento ou diminuição de lucros neste estudo foi considerado igual a zero.

➤ A Tabela 5.13 mostra a mão de obra requerida por ha para cada cultura no período de um ano

Tabela 5.13 – Mão de obra requerida por cultura/ha para o período de 1 ano

Culturas	Mão-de-obra/ha para 1 ano
Banana	235
Tomate	252
Goiaba	111
Melancia	115
Melão	137
Feijão	61
Milho	55
Algodão	103
Arroz	107

Fonte: Banco do Nordeste (1997)

## e) Dados referentes ao sistema de irrigação

➤ A Tabela 5.14 mostra os tipos de sistema de irrigação, suas eficiências e pressões requeridas.

Tabela 5.14 - Sistema de irrigação para as culturas, suas eficiências e pressões requeridas

Culturas	Sist. irrigação	Eapl (%)	Hc (mca)
banana nanicão	gotejamento	95	30
tomate	sulco	50	0
goiaba	gotejamento	95	30
melancia	gotejamento	95	30
melão japonês	gotejamento	95	30
feijão	aspersão	75	50
milho	aspersão	75	50
algodão	aspersão	75	50
arroz	sulco	50	0

Fonte: Christofidis (1999)

➤ Custo do investimento de implantação do sistema, segundo a Conta Cultural do Banco do Nordeste (Banco do Nordeste, 1997):

gotejamento = 5.000 R\$/ha

Aspersão = 3.000 R\$/ha

Sulco = 1.000 R\$/ha

**Cenário C2**

Neste cenário o número de horas de funcionamento das bombas foi aumentado de 8 para 20 horas, para se verificar o máximo potencial hídrico do reservatório e poços para a irrigação para os períodos médio, seco e chuvoso, tendo em vista que a capacidade de bombeamento limita o quanto pode ser retirado de volume de água do reservatório e do aquífero.

Os demais dados deste cenário são os mesmos do cenário C1 e foram feitos testes para o uso conjunto do reservatório e poços e para o uso apenas do reservatório.

### ***Cenário C3***

O objetivo deste cenário é verificar a influência que as áreas máximas por cultura, determinadas nas restrições no modelo, exercem no processo de otimização. Os dados usados são os mesmos do cenário anterior e foi feito o uso conjunto do reservatório e poços.

### ***Cenário C4***

Para este cenário utilizou-se apenas a água dos poços para se verificar o comportamento do sistema quando sendo o aquífero a única fonte hídrica para a irrigação do perímetro.

### ***Cenário C5***

Neste cenário foi estudado o comportamento do sistema quando usado o reservatório e o aquífero com sua capacidade reduzida.

### ***Cenário C6***

O objetivo deste cenário é verificar o comportamento do sistema em situações de ocorrência de dois e até cinco anos seguidos de seca. Para este cenário foram usados os valores mensais de precipitação e vazão do ano mais seco e também séries de dois, três, quatro e cinco anos caracterizadas como séries de anos secos. Os demais dados são iguais ao do cenário anterior e foi usada a água do reservatório e dos poços.

### ***Cenário C7***

Este cenário tem por objetivo verificar o comportamento do sistema quanto sujeito a redução de vazões no caso de apropriação de parte das afluentes com a construção de



novos reservatórios a montante do Açude Engenheiro Arcoverde. Os testes foram feitos para o ciclo médio e para a função objetivo 1, 20 horas de bombeamento e fazendo-se uso do reservatório e poços. Os demais dados são iguais ao do primeiro cenário.

### ***Cenário 8***

Neste cenário é possível observar o comportamento do sistema à luz de mudanças no plano cultural, podendo-se observar se as alterações no plano cultural conduziram a uma melhor receita e um melhor aproveitamento dos recursos hídricos. Foi feito uso conjunto do reservatório e poços, só poços e também foi feita a otimização para a capacidade do aquífero reduzida para o período seco. Os dados de entrada do modelo para este cenário são iguais aos dos demais cenários.

### ***Cenário 9***

O cenário C9 foi simulado para a função objetivo 2, que é a Maximização da geração de emprego, onde o modelo fornece as áreas por cultura que geram o maior número de empregos, permitindo assim uma análise dos benefícios sociais proporcionado pelo perímetro irrigado.

Os dados de entrada são iguais àqueles usados no cenário C1, porém para 20 horas de bombeamento. As fontes hídricas usadas para este cenário são o reservatório e os poços e os testes foram feitos para os períodos médio, seco e chuvoso.

### ***Cenário 10***

Neste cenário, o modelo foi otimizado para uma nova função objetivo resultante da ponderação entre a função objetivo 1 e a função objetivo 2, que são respectivamente, a maximização da receita líquida e maximização da geração de emprego. O teste foi feito para o ciclo médio, em que os dados de precipitação e de vazão são valores médios mensais da série total, que correspondem ao período de 1973 a 1991 e para o uso conjunto

do reservatório superficial e do aquífero.

Os demais dados são os mesmos usados para o Cenário C9.

### ***Cenário 11***

Para o ciclo médio e a função objetivo 1, foram feitos testes para obter-se o volume inicial ótimo do reservatório, isto é, o volume inicial do reservatório que conduz a uma maior receita líquida para o perímetro de irrigação de Condado.

### ***Cenário 12***

Tem-se como objetivo neste cenário, a quantificação da receita líquida que ocorre com a mudança dos métodos de irrigação. As análises foram feitas para o ciclo médio e as áreas ótimas por culturas foram obtidas visando o maior retorno financeiro.

### ***Cenário 13***

O objetivo deste cenário é observar a variabilidade da receita líquida quando sujeita a variações no preço da água captada do reservatório.

## 5.2 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.2.1 – Análise do cenário C1

Entre o cenário C1-A, em que a água para a irrigação é retirada dos poços e reservatório (Tabela 5.15) e o cenário C1-B, em que a água é retirada apenas do reservatório (Tabela 5.16), observa-se uma diferença para os períodos médio e seco em relação a área total plantada e a receita líquida obtida com a otimização.

Para o período médio ocorreu uma redução de 5,6% da área plantada e 1,94% da receita líquida no cenário C1-B em relação ao cenário C1-A. No ano seco essas porcentagens foram um pouco maiores: 10% de redução de área plantada e 7,04% de redução de receita líquida obtida quando feito uso da água apenas do reservatório, em relação ao uso conjunto dos poços e reservatório na otimização. Isso mostra a importância que um suporte hídrico adicional, oferecido pela água dos poços, associado a uma função objetivo que dá prioridade a maximização da receita líquida, tem no processo de otimização das culturas irrigadas.

Para o período de entressafra houve uma redução na área irrigada, para os ciclos médio e seco, por coincidir o plano cultural com o período de estiagem, que vai de agosto a novembro, e ser neste período que o reservatório praticamente não recebe afluxos e sofre grandes perdas por evaporação reduzindo, portanto, a sua disponibilidade hídrica para a irrigação.

Tabela 5.15 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 8 hs de bombeamento ( Cenário C1-A)

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	46,54	46,54	46,54
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	60	45,09	60
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	0	0	0
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	3,46	0	3,46
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	0
algodão entressafra	0	0	0
arroz safra	40	0	40
arroz entressafra	19,42	0	40
área (safra)	230	186,54	230
área (entressafra)	165,96	131,63	186,54
<b>área (total)</b>	<b>349,42</b>	<b>271,63</b>	<b>370,00</b>
<b>receita líquida (R\$)</b>	<b>3,09*10<sup>6</sup></b>	<b>2,84*10<sup>6</sup></b>	<b>3,14*10<sup>6</sup></b>
área máx. mensal	230	186,54	230

Tabela 5.16 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório, com 8 hs de bombeamento (Cenário C1-B)

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	46,54	46,54	46,54
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	60	17,85	60
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	0	0	0
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	17,21	0	3,46
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	0
algodão entressafra	0	0	0
arroz safra	26,24	0	40
arroz entressafra	0	0	40
área (safra)	229,99	186,54	230
área (entressafra)	146,54	104,39	186,54
<b>área (total)</b>	<b>329,99</b>	<b>244,39</b>	<b>370,00</b>
<b>receita líquida (R\$)</b>	<b>3,03*10<sup>6</sup></b>	<b>2,64*10<sup>6</sup></b>	<b>3,13*10<sup>6</sup></b>
área máx. mensal	229,99	186,54	230

O ciclo chuvoso não apresenta mudanças, em relação a receita líquida e as áreas alocadas por culturas, tanto no cenário C1-A (poços e reservatórios), quanto no cenário C1-B (reservatório), quando esperava-se uma área maior para o cenário C1-A. Este fato sugere que a área alocada no período chuvoso se deve a limitação da capacidade de bombeamento imposta no modelo, já que no período de entressafra não foi possível irrigar a área máxima de 230 ha. Isso foi verificado no cenário C2.

### 5.2.2 – Análise do cenário C2

Este cenário tem o objetivo de verificar o comportamento do sistema quando é aumentada a capacidade de bombeamento da água dos poços e reservatório para a irrigação.

Aumentou-se a capacidade de bombeamento, através do número de horas de funcionamento das bombas de 8 hs para 20 hs. Os resultados do cenário C2-A (Tabela 5.17) mostram áreas maiores a serem irrigadas no período de entressafra do ano chuvoso, já que no período de safra a área alocada era a máxima permissível, 230 ha no cenário anterior (C1-A), com 8 hs de bombeamento.

Para a situação com 20 hs de bombeamento, também observa-se, no período chuvoso, uma diferença na área total cultivada quando feito uso conjunto da água do reservatório e poços, 400 ha (Tabela 5.17) e quando retirado água só do reservatório, 392,97 ha (Tabela 5.18), devido a disponibilidade hídrica do primeiro caso ser maior que no segundo, fazendo-se necessário uma redução na área plantada com arroz entressafra no cenário C2-B. Essa diferença de área total plantada entre os cenários C2-A e C2-B para o ano chuvoso, a qual não ocorreu entre os cenários C1-A e C1-B, mostra que o número de horas de funcionamento das bombas é um fator limitante da quantidade de água retirada para a irrigação, influenciando na área a ser irrigada.

Tabela 5.17 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento (Cenário C2-A)

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	60	60	60
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	60	15,61	60
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	40	40	40
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	1,78	0	0
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	0
algodão entressafra	0	0	0
arroz safra	28,22	0	30
arroz entressafra	0	0	30
área (safra)	230	200	230
área (entressafra)	200	155,61	230
<b>área (total)</b>	<b>370,00</b>	<b>295,61</b>	<b>400,00</b>
<b>receita líquida (R\$)</b>	<b>3,45*10<sup>6</sup></b>	<b>2,96*10<sup>6</sup></b>	<b>3,52*10<sup>6</sup></b>
área máx. mensal	230	200	230

Tabela 5.18 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório, com 20 hs de bombeamento (Cenário C2-B)

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	60	48,22	60
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	39,5	0	60
goiaba	0	0	7,03
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	40	40	40
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	0	0	0
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	0
algodão entressafra	0	0	0
arroz safra	0	0	22,97
arroz entressafra	0	0	22,97
área (safra)	200	188,22	230
área (entressafra)	179,5	128,22	230
<b>área (total)</b>	<b>319,50</b>	<b>268,22</b>	<b>392,97</b>
<b>receita líquida (R\$)</b>	<b>3,2*10<sup>6</sup></b>	<b>2,55*10<sup>6</sup></b>	<b>3,51*10<sup>6</sup></b>
área máx. mensal	229,99	186,54	230

Comparando-se as Tabelas 5.17 dos resultados do cenário C2-A (poços e reservatório, com 20 hs de bombeamento) e Tabela 5.15 dos resultados do cenário C1-A (poços e reservatório, com 8 hs de bombeamento), observa-se, para os períodos médio e seco, que ocorreu um aumento da área total cultivada de 5,9% e 8,83%, respectivamente.

Porém, para o cenário C2-B em que fez-se uso apenas do reservatório, mas com uma maior capacidade de bombeamento (Tabela 5.18), ocorreu no período médio, uma redução na área total plantada em relação a situação em que se trabalhou com a capacidade de bombeamento mais restrita no cenário C1-B (Tabela 5.16). Este resultado é justificado pelo fato de que algumas culturas, cujo sistema de irrigação está diretamente relacionado a capacidade de suas bombas (o caso das culturas irrigadas por gotejamento e aspersão), apresentam maior receita líquida do que aquelas irrigadas por sulco, como o tomate e o arroz, logo, quando facilitada a retirada de um maior volume de água pelas bombas, o modelo diminui as áreas alocadas para o arroz safra e tomate entressafra e irriga a área máxima determinada para a banana e a melancia entressafra que são mais rentáveis. Por isso, apesar da área total ter diminuído em 3,17%, houve um aumento da receita líquida em 5,61% para o período médio.

Para o período seco isso não ocorreu, porque mesmo aumentando-se a capacidade de bombeamento existe o limite da disponibilidade hídrica referente a esse período, não alocando-se a área máxima da banana que é uma cultura mais rentável, mas que necessita ser irrigada o ano todo.

### *Volumes de água retirados do reservatório*

Em relação as extrações de água feitas do reservatório para a irrigação, conforme as Figuras 5.1 e 5.2, mostram que as captações máximas feitas do reservatório, no período de safra, quando em uso conjunto com o aquífero, é menor em relação ao uso feito apenas do reservatório para os anos médio, seco e chuvoso, permitindo uma economia na quantidade de água a ser demandada do reservatório.

As retiradas do reservatório para a irrigação no período de safra foram: 110.000 m<sup>3</sup>/mês, 166.667 m<sup>3</sup>/mês, 40.000 m<sup>3</sup>/mês para os períodos médios, seco e chuvoso, respectivamente, quando em uso conjunto com os poços. Para a situação em que não se fez uso do aquífero, esses valores foram: 150.000 m<sup>3</sup>/mês para o ano médio, 238.333 m<sup>3</sup>/mês

para o ano seco e 76.660 m<sup>3</sup>/mês para o ano chuvoso.

No período de entressafra ocorreu também uma economia no consumo da água do reservatório para o ano chuvoso de 11,67%, em relação a situação em que não retirou-se água do aquífero.

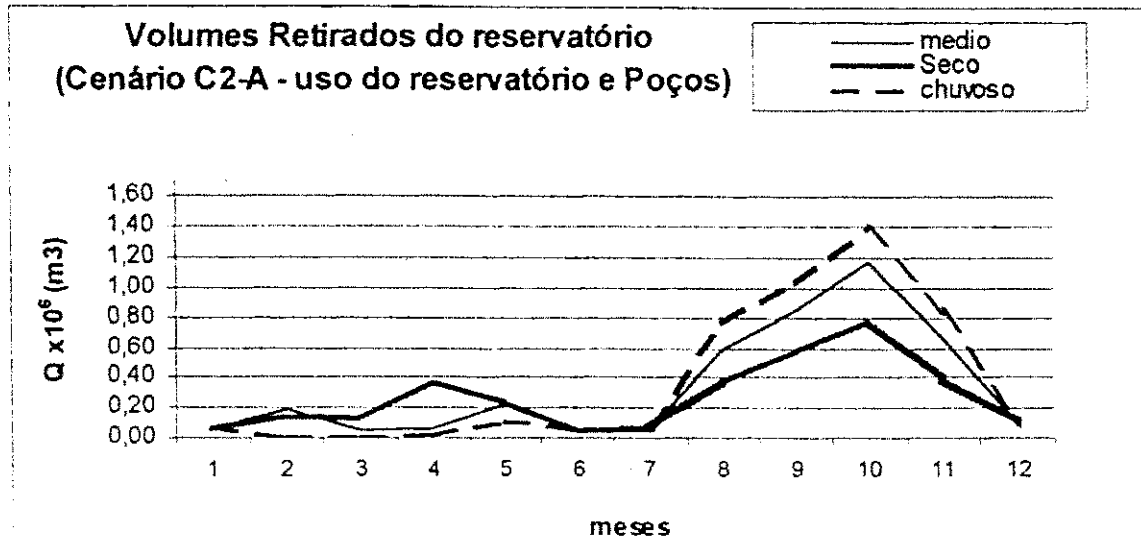


Figura 5.1 – Gráfico dos volumes retirados do reservatório para a irrigação quando feito uso da água do reservatório e dos poços (Cenário C2-A).

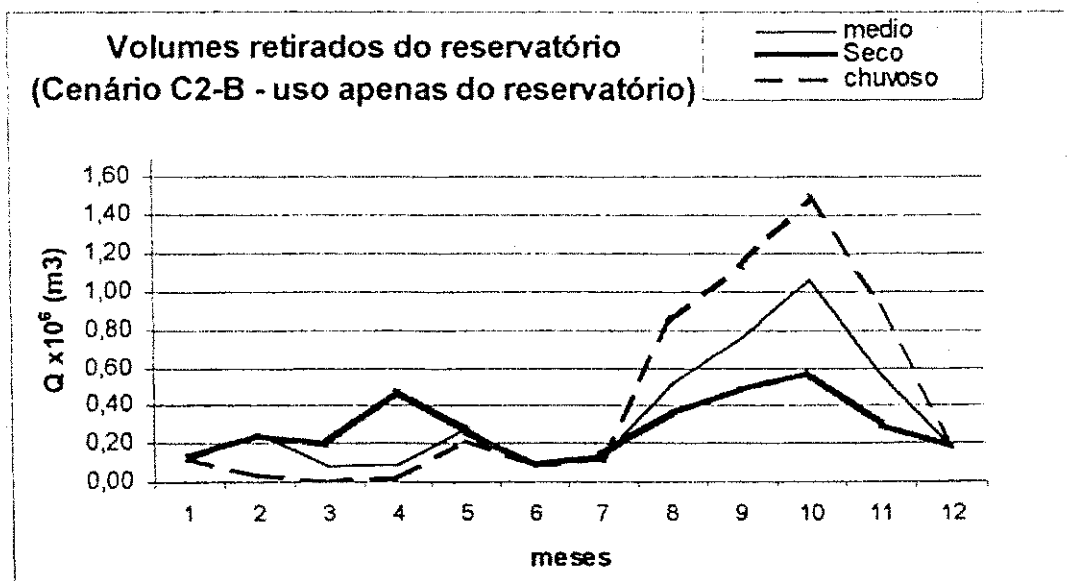


Figura 5.2 – Gráfico dos volumes retirados do reservatório para a irrigação, fazendo-se uso apenas do reservatório (Cenário C2-B).



Em todos os casos testados, não foi estabelecido nas restrições áreas mínimas a serem plantadas por culturas, permitindo o modelo escolher, dentro das restrições estabelecidas, a área por cultura a ser plantada que melhor aproveite a disponibilidade hídrica do período em que está se realizando a otimização e que dá o maior retorno financeiro.

### 5.2.3 – Análise do Cenário C3

As áreas máximas por cultura determinadas nas restrições do modelo exercem forte influência no processo de otimização. Isso foi verificado quando restringiu-se as áreas máximas por cultura a metade daquelas estabelecidas inicialmente (Tabela 5.19).

No cenário C3, a otimização foi realizada para os períodos médio, seco e chuvoso, fazendo-se uso da água do reservatório e poços e com 20 horas de bombeamento. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5.19 – Culturas e respectivas áreas máximas permitidas em ha

cultura	Área máx. reduzida a metade (ha)	Área máx. padrão (ha)
banana	30	60
tomate safra	30	60
tomate entressafra	30	60
goiaba	20	40
melancia safra	20	40
melancia entressafra	20	40
melão safra	20	40
melão entressafra	20	40
feijão safra	40	80
feijão entressafra	40	80
milho safra	30	60
milho entressafra	30	60
algodão safra	20	40
algodão entressafra	20	40
arroz safra	20	40
arroz entressafra	20	40

Tabela 5.20 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento e área máxima reduzida a metade.

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	30	30	30
tomate safra	30	30	30
tomate entressafra	30	30	30
goiaba	20	20	20
melancia safra	20	20	20
melancia entressafra	20	20	20
melão safra	20	20	20
melão entressafra	20	20	20
feijão safra	40	40	40
feijão entressafra	40	0	40
milho safra	30	0	30
milho entressafra	0	0	15
algodão safra	20	0	20
algodão entressafra	16,75	0	20
arroz safra	20	20	20
arroz entressafra	20	9,33	20
área (safra)	230	180	230
área (entressafra)	196,75	129,33	215
área (total)	376,75	259,33	395,00
receita líquida (R\$)	1,902*10 <sup>6</sup>	1,808*10 <sup>6</sup>	1,92*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	230	180	230

Quando comparando-se as Tabelas 5.20 e 5.17 observa-se um ligeiro aumento na área irrigada, em torno de 1,8% para o período médio, com um acentuado decréscimo na receita líquida de 44,87%. Para o ano seco ocorreu uma redução de 12,27% na área total plantada e 38,92% na receita líquida e para o ano chuvoso a redução foi de 1,25% na área total cultivada e 45,5% na receita líquida. Pode-se verificar pelos resultados da Tabela 5.20, que a água foi alocada para irrigar culturas menos rentáveis como o feijão, milho e algodão, o que resultou em uma receita bem menor. Ou seja, a redução na área máxima plantada por cada cultura provoca um aproveitamento de disponibilidade hídrica para irrigar as culturas menos rentáveis, provocando portanto uma queda acentuada na receita líquida apesar da área máxima cultivada não sofrer grandes alterações.

#### 5.2.4 – Análise do cenário C4

Para o cenário C4, em que utiliza-se água apenas dos poços para a irrigação, os testes foram realizadas com dados hidrológicos mensais para um período de um ano, tanto para o ciclo médio, como para os ciclos seco e chuvoso. As áreas máximas por cultura são as da Tabela 5.7 e utilizou-se 20hs de bombeamento.

Os resultados de áreas alocadas e receitas líquidas para este cenário estão na Tabela 5.21, os quais apresentam-se variados entre os diferentes ciclos. Isso ocorre em razão de ser a irrigação um suplemento hídrico para as culturas, logo, como a capacidade do aquífero é considerada igual para todos os períodos neste cenário, obtém-se uma área menor para o período seco, em que ocorre precipitações menores e áreas sucessivamente maiores para o ano médio e chuvoso, respectivamente. A área total irrigada no ano seco é menor em relação ao ano médio, em 53,19% e a receita líquida em 18,50%. Comparando o ano seco ao ano chuvoso, essas porcentagens são ainda um pouco maiores: 58,88% de redução na área irrigada e 20,6% de redução na receita líquida.

Porém, no período de entressafra, a área total alocada para as culturas são iguais nos diferentes ciclos. O período de entressafra caracteriza-se por ser um período de estiagem das chuvas (entre os meses de agosto à novembro), resultando em necessidades hídricas para as culturas aproximadamente iguais em todos os períodos : médio, seco e chuvoso. Tendo-se uma mesma quantidade de água disponível para se extrair do aquífero para todos os períodos, obteve-se áreas alocadas iguais para a irrigação, correspondente a 9,7% da área máxima do perímetro.

Tabela 5.21 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água dos poços, com 20 hs de bombeamento (Cenário C4)

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	0	0	0
tomate safra	42,96	0	60
tomate entressafra	0	0	0
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	24,39	40
melancia entressafra	0	0	0
melão safra	40	40	40
melão entressafra	22,09	22,09	22,09
feijão safra	12,61	0	80
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	3,69
algodão entressafra	0	0	0
arroz safra	0	0	6,31
arroz entressafra	0	0	0
área (safra)	135,57	64,39	230
área (entressafra)	22,09	22,09	22,09
área (total)	157,66	86,48	252,09
receita líquida (R\$)	1,34*10 <sup>6</sup>	1,00*10 <sup>6</sup>	1,49*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	135,57	64,39	230

Com os resultados deste cenário pode-se concluir, supondo-se que a disponibilidade hídrica do aquífero é constante, que a irrigação feita só com água dos poços é fortemente influenciada pela ocorrência de chuvas, uma vez que observa-se uma grande diferença quanto a área alocada no período de safra, em que ocorre as chuvas, para as diferentes situações climáticas: 135,57 ha para o ano médio, 64,39 ha para o ano seco e 230 ha para o ano chuvoso. Para o período de entressafra, a área total irrigada foi de 22,09 ha para os anos médio, seco e chuvoso.

Os valores de entressafra são importantes para se definir, com certa segurança as áreas máximas a serem alocadas para as culturas perenes, que precisam ser irrigadas o ano todo.

### 5.2.5 – Análise do cenário C5

Neste cenário, para o ano seco, limitou-se a capacidade máxima do aquífero a 1/3 da reserva correspondente a esse período, cerca de 23.000 m<sup>3</sup> por mês, de acordo com os estudos realizados no aquífero de Condado por Rêgo e Albuquerque (1999), mostrados no item 3.2.5 do Capítulo III deste trabalho. Este valor, conforme o estudo realizado, é estimado para um ano seco com previsão de anos seguidos de seca, sendo esta a hipótese considerada neste cenário.

Conforme a Tabela 5.22, ocorreu uma redução de 7,12% da área a ser plantada e de 8,11% da receita líquida em relação ao período seco do cenário C2-A, em que se trabalhou com a capacidade máxima do aquífero, estimada em 100.000 m<sup>3</sup> por mês.

Tabela 5.22 – Áreas em ha por cultura e receita líquida em R\$ obtidos com a otimização para a capacidade máxima do aquífero e para apenas 1/3 da sua reserva, em ambos os casos em conjunto com o reservatório e com 20hs de bombeamento.

Cultura	seco	seco (1/3 reserva do aquífero)
banana	60	54,57
tomate safra	60	60
tomate entressafra	15,61	0
goiaba	0	0
melancia safra	40	40
melancia entressafra	40	40
melão safra	40	40
melão entressafra	40	40
feijão safra	0	0
feijão entressafra	0	0
milho safra	0	0
milho entressafra	0	0
algodão safra	0	0
algodão entressafra	0	0
arroz safra	0	0
arroz entressafra	0	0
área (safra)	200	194,57
área (entressafra)	155,61	134,57
área (total)	295,61	274,57
receita líquida (R\$)	2,96*10 <sup>6</sup>	2,72*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	178,61	194,57

Com relação aos volumes de água retirados do reservatório, mostrados na Figura 5.3, conclui-se que, no período seco, já é explorado todo o potencial do reservatório, pois

ao se reduzir a disponibilidade do aquífero praticamente não houve alteração nas extrações feitas ao reservatório ( média de 290.416 m<sup>3</sup>/mês), de acordo com o gráfico das vazões mensais retiradas do reservatório, o qual apresentou um pequeno aumento de 8,90%, em relação a otimização realizada com a disponibilidade máxima do aquífero (média de 266.667 m<sup>3</sup>/mês de volume de água retirado do reservatório).

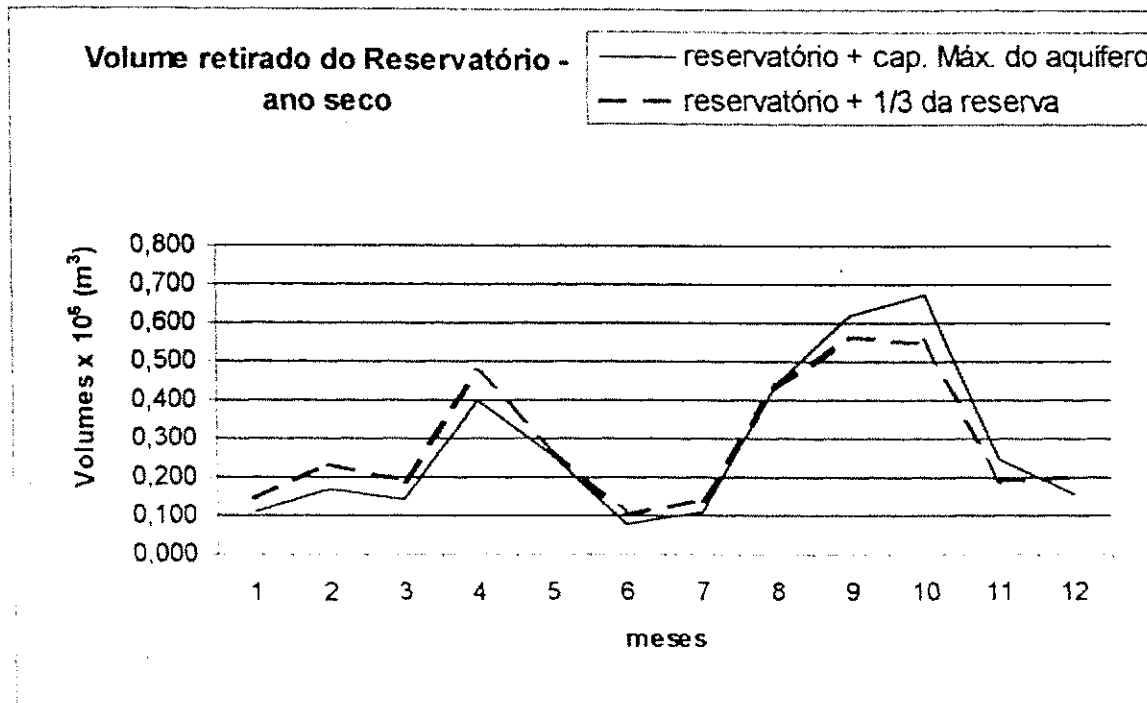


Figura 5.3 – Gráficos dos volumes extraídos do reservatório para a irrigação

A Figura 5.4, que apresenta os volumes extraídos dos poços, demonstra que é explorado o máximo da disponibilidade do aquífero, tendo as necessidades hídricas das culturas sido complementadas com a água do reservatório. Isso é verificado, tendo em vista que, no primeiro caso, a disponibilidade máxima é de 100.000 m<sup>3</sup>/mês (capacidade máxima do aquífero) e no segundo caso é de 23.000 m<sup>3</sup>/mês (1/3 da reservas do período seco) e os picos dos gráficos atingem esses valores algumas vezes ao longo do ano, coincidindo também com a época de cultivo conforme o plano cultural das culturas sazonais (Tabela 5.8).

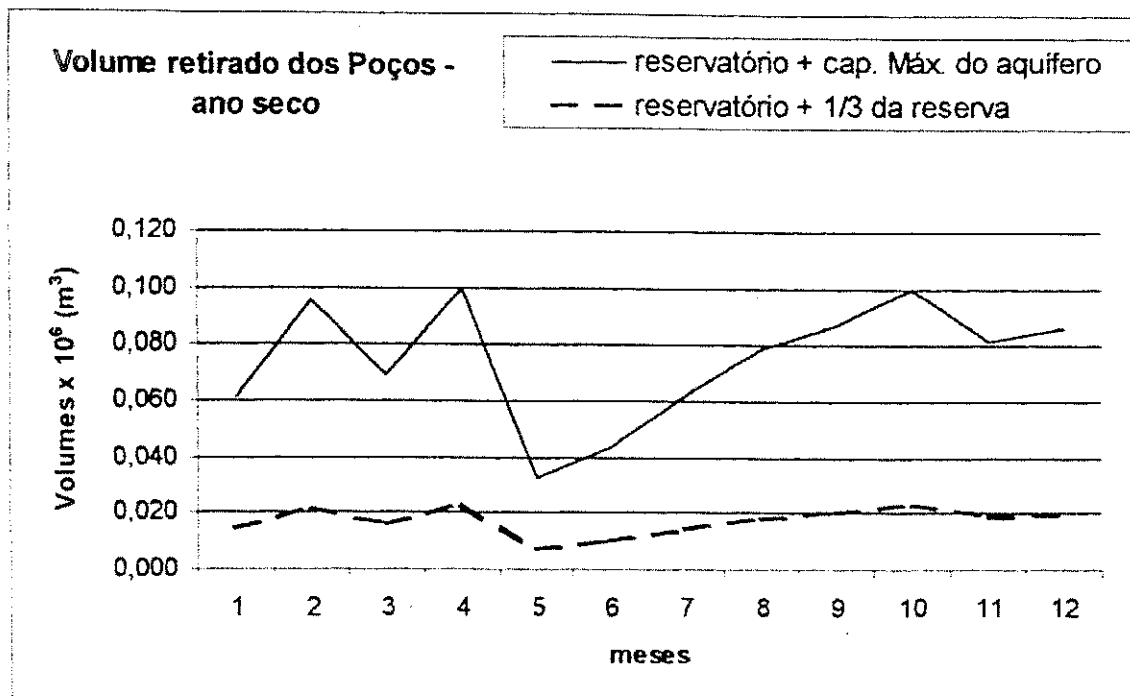


Figura 5.4 – Gráfico dos volumes retirados dos poços para a irrigação

Os resultados obtidos no cenário C5 em que otimizou-se as áreas irrigadas com 1/3 da reserva do período seco mais a disponibilidade do reservatório para este período, permite estabelecer uma maior segurança para a definição de áreas a serem cultivadas em um ano seco. Esta segurança pode ser aumentada se fizer uma previsão de mais de um ano de seca. Também tem-se uma estimativa da máxima receita líquida a ser gerada nesse período, de acordo com os valores de receita líquida por ha e para cada cultura adotada neste trabalho.

### 5.2.6 – Análise do cenário C6

Para a verificação do comportamento do sistema com situações de ocorrência de dois e até cinco anos seguidos de seca, foi feita uma simulação trabalhando-se com séries plurianuais. A capacidade máxima mensal do aquífero usada neste cenário foi de 23.000 m<sup>3</sup>/mês (1/3 da reserva), valor este estimado para os casos de anos seguidos de seca. Os resultados encontram-se na Tabela 5.27.

As séries plurianuais foram determinadas a partir dos dados de precipitação, correspondente ao período de 1973-1991, obtidos conforme explicado no Capítulo III, e criaram-se séries de dois, três, quatro e cinco anos seqüenciais, sobrepostas, retirando-se:

- O ano mais seco (Tabela 5.3)
- os dois anos seqüenciais de menor média anual de precipitação, que caracteriza dois anos secos (Tabela 5.23).
- os três anos seqüenciais de menor média anual de precipitação, que caracteriza três anos secos (Tabela 5.24)
- os quatro anos seqüenciais de menor média anual de precipitação, que caracteriza quatro anos secos (Tabela 5.25)
- os cinco anos seqüenciais de menor média anual de precipitação, que caracteriza cinco anos secos (Tabela 5.26)

Tabela 5.23 - Dados de vazão afluente ao reservatório e precipitação para a série (1982-1983) que caracteriza dois anos secos

Q afluente (mm/mês)			Precipitação(mm/mês)		
Mês	1ºano	2ºano	Mês	1ºano	2ºano
Janeiro	0	0	Janeiro	21,5	34,7
Fevereiro	0	1,5	Fevereiro	45,8	103,1
Março	0	8,1	Março	87,4	136,6
Abril	29,7	0	Abril	245,2	48,3
Maio	0	0	Maio	54,9	14,6
Junho	0	0	Junho	14,3	11,4
Julho	0	0	Julho	10,2	8,4
Agosto	0	0	Agosto	7,2	9,5
Setembro	0	0	Setembro	8,6	8,1
Outubro	0	0	Outubro	7,9	13,4
Novembro	0	0	Novembro	12,6	4,9
Dezembro	0	0	Dezembro	18,5	9,8
Total	29,7	9,6	Total	534,1	402,8



Tabela 5.24 - Dados de vazão afluente ao reservatório e precipitação para a série (1981-1983) que caracteriza três anos secos

Q afluente (mm/mês)				Precipitação(mm/mês)			
Mês	1ºano	2ºano	3ºano	Mês	1ºano	2ºano	3ºano
Janeiro	0	0	0	Janeiro	83,7	21,5	34,7
Fevereiro	0	0	1,5	Fevereiro	22,3	45,8	103,1
Março	67,7	0	8,1	Março	404,4	87,4	136,6
Abril	3,7	29,7	0	Abril	42,7	245,2	48,3
Mai	0	0	0	Mai	7,5	54,9	14,6
Junho	0	0	0	Junho	15,4	14,3	11,4
Julho	0	0	0	Julho	7,4	10,2	8,4
Agosto	0	0	0	Agosto	6,4	7,2	9,5
Setembro	0	0	0	Setembro	8,1	8,6	8,1
Outubro	0	0	0	Outubro	8,2	7,9	13,4
Novembro	0	0	0	Novembro	35,5	12,6	4,9
Dezembro	0	0	0	Dezembro	28,3	18,5	9,8
Total	71,4	29,7	9,6	Total	669,9	534,1	402,8

Tabela 5.25 - Dados de vazão afluente ao reservatório e precipitação para a série (1980-1983) que caracteriza quatro anos secos

Q afluente (mm/mês)					Precipitação(mm/mês)				
Mês	1ºano	2ºano	3ºano	4ºano	Mês	1ºano	2ºano	3ºano	4ºano
Janeiro	0	0	0	0	Janeiro	58	83,7	21,5	34,7
Fevereiro	25,8	0	0	1,5	Fevereiro	225,9	22,3	45,8	103,1
Março	4,7	67,7	0	8,1	Março	119,4	404,4	87,4	136,6
Abril	0	3,7	29,7	0	Abril	48,2	42,7	245,2	48,3
Mai	0	0	0	0	Mai	8,7	7,5	54,9	14,6
Junho	0	0	0	0	Junho	17,9	15,4	14,3	11,4
Julho	0	0	0	0	Julho	7,9	7,4	10,2	8,4
Agosto	0	0	0	0	Agosto	6,4	6,4	7,2	9,5
Setembro	0	0	0	0	Setembro	9,2	8,1	8,6	8,1
Outubro	0	0	0	0	Outubro	13,5	8,2	7,9	13,4
Novembro	0	0	0	0	Novembro	18,2	35,5	12,6	4,9
Dezembro	0	0	0	0	Dezembro	11,3	28,3	18,5	9,8
Total	30,5	71,4	29,7	9,6	Total	544,6	669,9	534,1	402,8

Tabela 5.26 - Dados de vazão afluente ao reservatório e precipitação para a série (1979-1983) que caracteriza cinco anos secos

Mês	Q afluente (mm/mês)					Mês	Precipitação (mm/mês)				
	1ºano	2ºano	3ºano	4ºano	5ºano		1ºano	2ºano	3ºano	4ºano	5ºano
Janeiro	0	0	0	0	0	Janeiro	66	58	83,7	21,5	34,7
Fevereiro	9,3	25,8	0	0	1,5	Fevereiro	142,6	225,9	22,3	45,8	103,1
Março	6,8	4,7	67,7	0	8,1	Março	129,7	119,4	404,4	87,4	136,6
Abril	8,1	0	3,7	29,7	0	Abril	136,2	48,2	42,7	245,2	48,3
Mai	0	0	0	0	0	Mai	68,2	8,7	7,5	54,9	14,6
Junho	0	0	0	0	0	Junho	21,4	17,9	15,4	14,3	11,4
Julho	0	0	0	0	0	Julho	11,2	7,9	7,4	10,2	8,4
Agosto	0	0	0	0	0	Agosto	6,1	6,4	6,4	7,2	9,5
Setembro	0	0	0	0	0	Setembro	25,7	9,2	8,1	8,6	8,1
Outubro	0	0	0	0	0	Outubro	34	13,5	8,2	7,9	13,4
Novembro	0	0	0	0	0	Novembro	37,8	18,2	35,5	12,6	4,9
Dezembro	0	0	0	0	0	Dezembro	27,8	11,3	28,3	18,5	9,8
Total	24,2	30,5	71,4	29,7	9,6	Total	706,7	544,6	669,9	534,1	402,8

Tabela 5.27 - Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento, utilizando as séries plurianuais de precipitação e de vazão, correspondentes aos períodos de 1, 2, 3, 4 e 5 anos secos.

Cultura	Período Seco				
	1 ano	2 anos	3 anos	4 anos	5 anos
banana	54,57	0	2,21	0	0
tomate safra	60	1,87	59,93	2,27	0
tomate entre	0	0	0	0	0
goiaba	0	0	0	0	0
melancia s	40	39,73	40	13,76	0
melancia ent	40	0	0	0	0
melão s	40	40	40	40	40
melão ent	40	40	40	40	10,88
feijão s	0	0	0	0	0
feijão ent	0	0	0	0	0
milho s	0	0	0	0	0
milho ent	0	0	0	0	0
algodão s	0	0	0	0	0
algodão ent	0	0	0	0	0
arroz s	0	0	0	0	0
arroz ent	0	0	0	0	0
área (safra)	194,57	81,6	142,14	56,03	40
área (entressafra)	134,57	40	42,21	40	10,88
área (total por ano)	274,57	121,60	182,14	96,03	50,88
receita líquida (R\$) por ano	2,72*10 <sup>6</sup>	1,39*10 <sup>6</sup>	1,79*10 <sup>6</sup>	1,30*10 <sup>6</sup>	0,70*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	194,57	81,6	142,14	56,03	40

Os resultados obtidos com essas séries demonstram que uma mudança bastante significativa é observada em relação as áreas totais irrigadas quando testado para um período seco de um ano e quando para dois anos secos seguidos, principalmente, em relação a alocação de culturas perenes, que precisam ser irrigadas o ano todo. Com isso, mostra-se necessário um planejamento bastante cuidadoso em relação as culturas e áreas a serem plantadas, quando previsto seca com durações maiores que um ano. Porém, não há muita variação na área a ser plantada comparando-se dois, três ou quatro anos de seca, principalmente no período de entressafra. Com isso, conclui-se ser possível fazer um bom planejamento quando considera-se dois anos secos, pois com a ocorrência de até quatro anos secos consecutivos, não houve grandes alterações na área total a ser plantada. No entanto, observa-se para cinco anos secos consecutivos um comportamento bem adverso, com uma queda acentuada na área cultivada.

Ainda analisando os resultados apresentados na Tabela 5.27, encontra-se uma área maior a ser irrigada para um período de três anos secos em relação ao período de dois anos de seca, quando esperava-se que ocorresse uma diminuição na área a ser irrigada com o aumento no número de anos secos. A causa de tal comportamento parece estar relacionado a distribuição dos afluxos no intervalo de tempo considerado. Analisando as figuras 5.5a, 5.5b, 5.5c, 5.5d e 5.5e, que mostra os volumes precipitados e afluentes ao reservatório nos diversos ciclos secos, observa-se que o ciclo de três anos secos apresenta em suas séries de precipitação e vazão um volume maior logo no primeiro ano em relação aos ciclos de dois, quatro e cinco anos. Logo, para anos seguidos de seca, quando o primeiro ano apresenta um maior volume de afluxos ao reservatório e de precipitação no reservatório em relação aos outros anos, é possível plantar-se uma área maior. Conclui-se, então, que os resultados são sensíveis a ocorrência de maiores precipitações e afluxos no início da série (primeiro ano), assim como é sensível à definição do volume inicial.

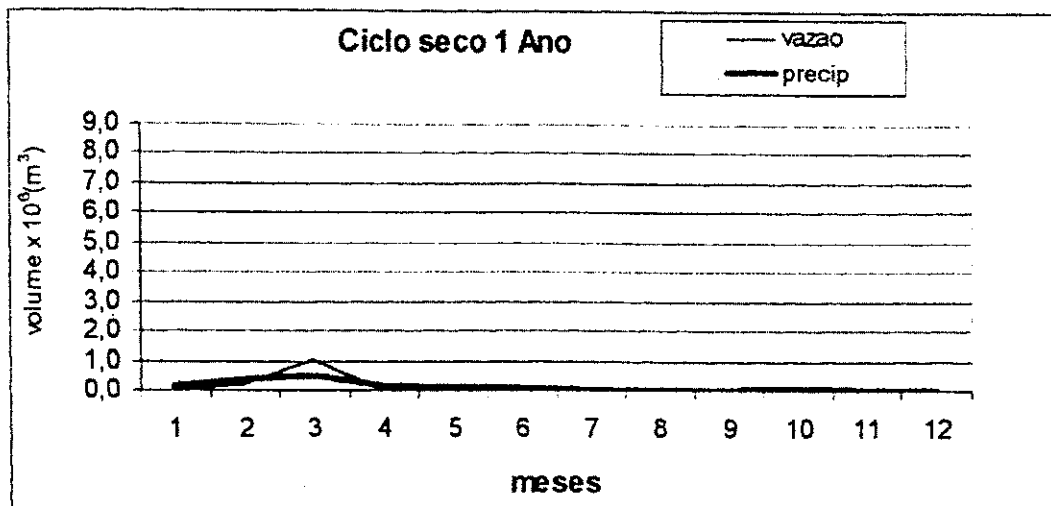


Figura 5.5a – Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no período seco de 1 ano.

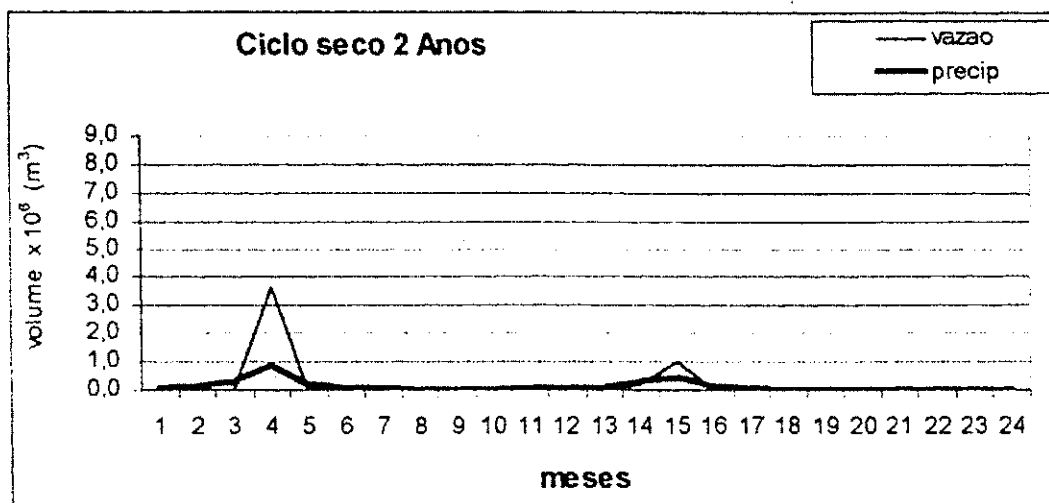


Figura 5.5b – Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclo de 2 anos secos.

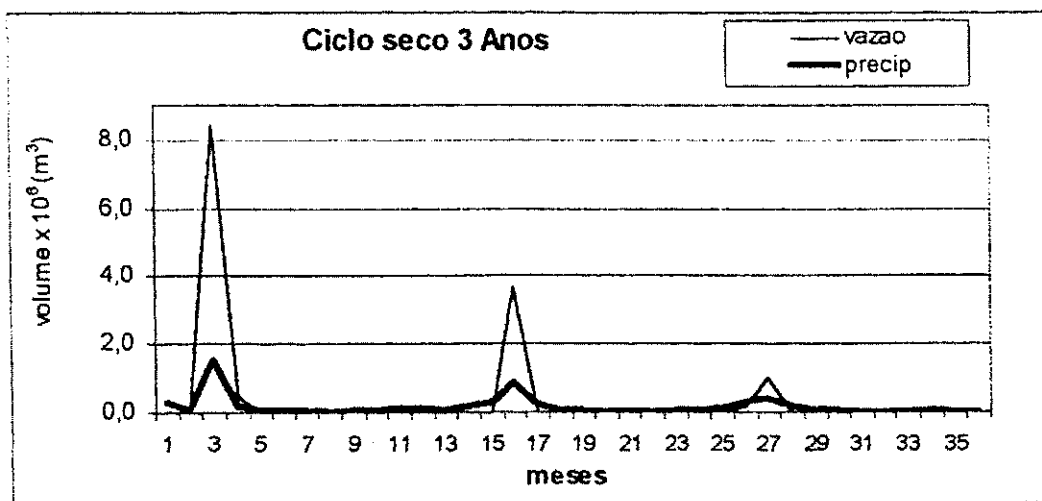


Figura 5.5c – Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclo de 3 anos secos.

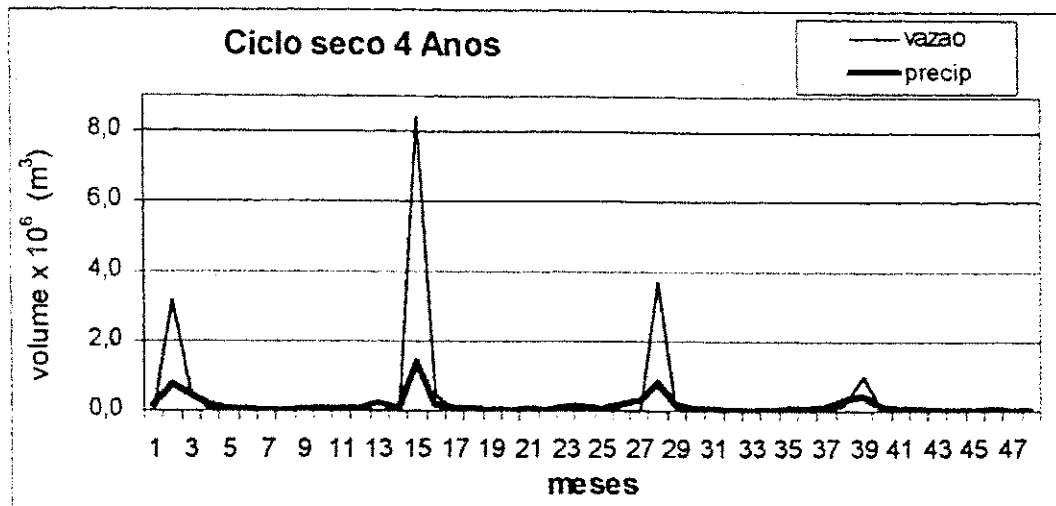


Figura 5.5d – Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclo de 4 anos secos.

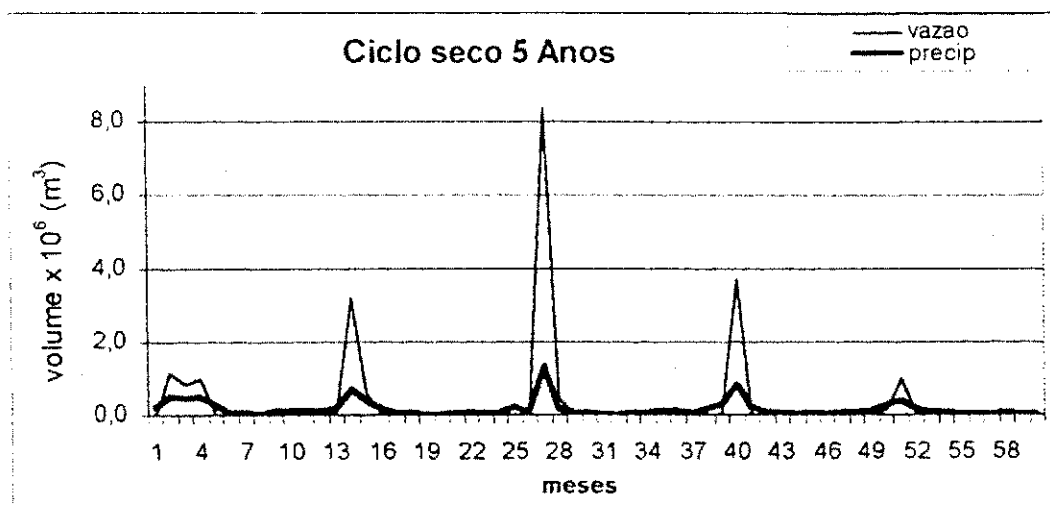


Figura 5.5e – Gráfico dos volumes precipitados e afluentes ao reservatório no ciclo de 5 anos secos.

### 5.2.7 – Análise do Cenário C7

Neste cenário foram realizadas reduções de 10, 20, 30 e 40% nas vazões mensais afluentes ao reservatório correspondentes a média da série dos dados de fluviometria mostrados na Tabela 3.4 no Capítulo III. Os demais dados usados neste cenário são os mesmos utilizados no cenário padrão, fazendo-se uso dos poços e reservatório. Tal situação visa a compreensão do comportamento do sistema quando ocorre a apropriação de parte das afluições com a construção de novos reservatórios a montante do Açude Engenheiro Arcoverde, como também analisar o comportamento do sistema sob condições mais críticas, ou seja, com menores volumes afluentes ao reservatório.

Observamos pela Tabela 5.28 que as reduções nas vazões influenciaram principalmente as áreas alocadas para a banana e o tomate entressafra. Observa-se uma diminuição na área a ser irrigada para a banana, que é uma cultura perene e precisa ser irrigada o ano todo, e a disponibilidade hídrica decresce a medida que aumenta as reduções de vazões afluentes. Para as culturas de entressafra, em todas as situações, o modelo procurou dar prioridade ao melão, que é a cultura de maior receita líquida entre as demais escolhidas neste estudo. A segunda prioridade foi dada a melancia ao invés do tomate, que apesar de apresentar maior receita que a melancia, possui um ciclo vegetativo maior, de quatro meses, necessitando de mais água para ser irrigada.

Tabela 5.28 – Áreas em ha por cultura e receita líquida em R\$ obtidos com a otimização para o ano médio, fazendo-se uso do reservatório e poços, 20hs de bombeamento, e reduções de 10%, 20%, 30% e 40% nos valores das vazões médias mensais afluentes ao reservatório.

Cultura	Percentual de reduções de vazões afluentes ao reservatório			
	10%	20%	30%	40%
banana	60	60	34,61	18,17
tomate safra	60	60	60	60
tomate entressafra	37,42	5,55	0	0
goiaba	0	0	0	0
melancia safra	40	40	40	40
melancia entressafra	40	40	40	0
melão safra	40	40	40	40
melão entressafra	40	40	40	40
feijão safra	0	0	0	0
feijão entressafra	0	0	0	0
milho safra	0	0	0	0
milho entressafra	0	0	0	0
algodão safra	0	0	0	0
algodão entressafra	0	0	0	0
arroz safra	0	0	0	0
arroz entressafra	0	0	0	0
área (safra)	200	200	174,61	158,17
área (entressafra)	177,42	145,55	114,61	58,17
área (total)	317,42	285,55	254,61	198,17
receita líquida (R\$)	3,19*10 <sup>6</sup>	2,87*10 <sup>6</sup>	2,47*10 <sup>6</sup>	2,02*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	200	200	140,34	133,09

Outra questão importante a ser levada em consideração, conforme observado na tabela acima é que a ocorrência de reduções a partir de 20% nas vazões afluentes mesmo em um ano de precipitação em torno da média, leva a resultados menos favoráveis do que os obtidos em ano seco, em termos de área total irrigada e receita líquida, conforme Tabela 5.17.

### 5.2.8 – Análise do cenário C8

Para se analisar o comportamento do sistema em termos de receita líquida e de aproveitamento dos recursos hídricos devido a mudança no plano cultural, foi criado este cenário denominado de cenário C8:

O plano cultural a partir do qual foram feitas alterações, gerando assim o novo

plano, será aqui chamado de plano cultural padrão, por ter sido usado em todas os demais testes e, servir de comparação com esse novo plano aqui estabelecido. As mudanças foram realizadas para as seguintes culturas: melancia, melão, feijão, milho, algodão e arroz. A nova distribuição mensal do plantio das culturas está apresentada na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 – Tabela do novo plano cultural

Culturas	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
banana	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
tomate safra		x	x	x	x							
tomate entressafra								x	x	x	x	
goiaba	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
melancia safra		x	x	x								
melancia entressafra						x	x	x				
melão safra		x	x	x								
melão entressafra						x	x	x				
feijão safra		x	x	x								
feijão entressafra						x	x	x				
milho safra		x	x	x	x							
milho entressafra									x	x	x	x
algodão safra		x	x	x	x							
algodão entressafra									x	x	x	x
arroz safra		x	x	x	x							
arroz entressafra									x	x	x	x

No novo plano cultural, antecipou-se para os meses de junho, julho e agosto o plantio das culturas de melancia, melão e feijão. As culturas milho, algodão e arroz, que eram plantadas de agosto a novembro passaram a ser plantadas de setembro a dezembro. Este novo plano foi estabelecido com a intenção de se irrigar mais culturas durante os meses de junho e julho e diminuir a irrigação no mês de agosto, quando inicia-se o período de estiagem.

A Tabela 5.30 corresponde aos resultados obtidos com a otimização feita para o novo plano cultural para o período de entressafra.



Tabela 5.30 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização para o novo plano cultural, fazendo-se uso da água dos poços e reservatório, com 20 hs de bombeamento

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	60	60	60
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	60	27,34	60
goiaba	20,61	0	0
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	40	40	40
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	0	0	0
feijão entressafra	0	0	30
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	11,09
algodão safra	0	0	0
algodão entressafra	0	0	40
arroz safra	9,39	0	30
arroz entressafra	0	0	40
área (safra)	230	200	230
área (entressafra)	220,61	167,34	321,09
área (total)	370,00	307,34	491,09
receita líquida (R\$)	3,48*10 <sup>6</sup>	3,08*10 <sup>6</sup>	3,61*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	230	200	230

Com a mudança no plano cultural observou-se um aumento expressivo na área a ser irrigada no período de entressafra (Tabela 5.30) em relação aos resultados obtidos com o plano cultural padrão (Tabela 5.17): 10,31% no período médio, 7,54% no seco e 39,60% no chuvoso. A área de entressafra do ano chuvoso totaliza 321,09 ha, distribuídas entre os meses de junho a agosto para a melancia, o melão e o feijão; entre os meses de agosto a novembro para o tomate e entre os meses de setembro a dezembro para as culturas do milho, algodão e arroz. Com isso as áreas plantadas mensalmente não superaram a área máxima de 230 ha, estabelecida nas restrições do modelo.

Outra vantagem observada com a mudança no plano cultural foi uma melhor distribuição ao longo dos meses, em relação aos volumes de água retirados do reservatório com o plano cultural padrão, para o qual observa-se que, da segunda quinzena do mês de maio a primeira quinzena do mês de julho, os valores extraídos do reservatório eram bem pequenos, com um grande aumento entre setembro e outubro chegando novamente a diminuir nos meses de novembro e dezembro (Figura 5.1). Com o novo plano cultural tem-

se, conforme Figura 5.6, uma maior uniformidade da retirada de água do reservatório, com maiores retiradas no início do período sem chuvas aproveitando melhor esta água que, do contrário, estaria sendo parcialmente consumida pela evaporação e proporcionando, assim, uma maior área irrigada e maiores receitas líquidas.

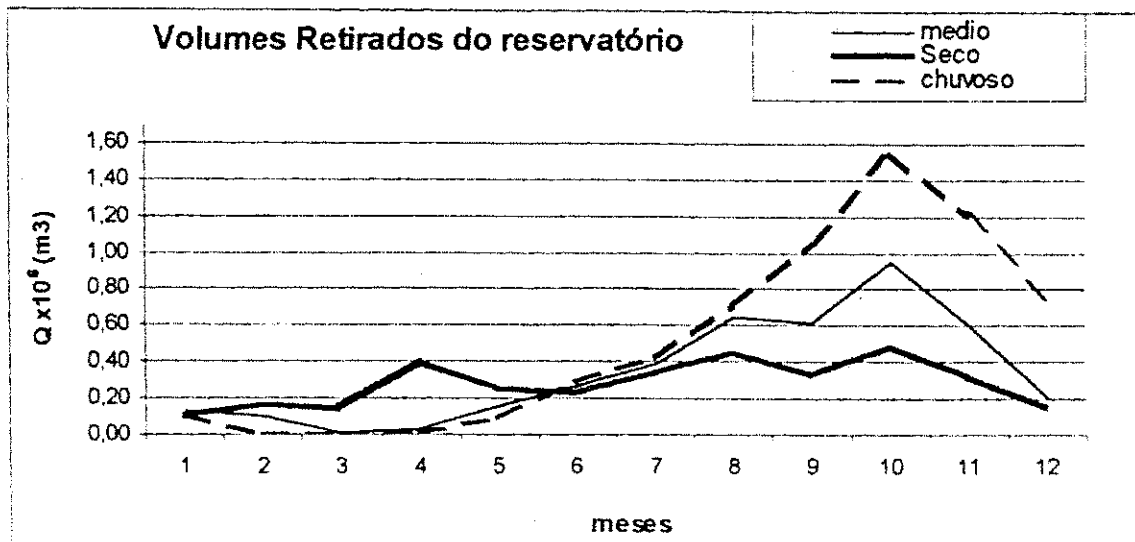


Figura 5.6 – Volumes de água retirados do reservatório obtidos da otimização com o novo plano cultural, fazendo-se uso do reservatório e poços e com 20hs de bombeamento.

Um teste foi realizado para verificar as melhorias que venham a ocorrer com a mudança no plano cultural para uma situação em que é extraído apenas água dos poços para a irrigação. Os resultados estão na Tabela 5.31. Comparando-os com aqueles alcançados no cenário C4, apresentados na Tabela 5.21, a partir do plano cultural padrão, observamos um aumento de 12% da área total plantada no período médio, 11,46% no período seco e 7,79% no período chuvoso. Com relação a receita líquida ocorreram aumentos de 15,67% para o ano médio, 20% para o ano seco e 14,76% para o ano chuvoso, mostrando, neste caso, também, que o planejamento cultural tem uma grande influência na alocação das áreas irrigadas por cultura e na receita líquida obtida.

Tabela 5.31 – Resultados da otimização com o novo plano cultural fazendo uso apenas da água dos poços

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	0	0	0
tomate safra	42,96	0	60
tomate entressafra	0,61	1,31	0
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	24,39	40
melancia entressafra	0	0	0
melão safra	40	40	40
melão entressafra	31,83	31,03	32,53
feijão safra	12,61	0	80
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	3,69
algodão entressafra	0	0	0
arroz safra	0	0	6,31
arroz entressafra	8,56	7,82	9,19
área (safra)	135,57	64,39	230
área (entressafra)	41	40,16	41,72
área (total)	176,57	104,55	271,72
receita líquida (R\$)	1,55*10 <sup>6</sup>	1,20*10 <sup>6</sup>	1,71*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	135,57	64,39	230

Observa-se na Figura 5.7, que fornece os volumes de água retirados dos poços para a irrigação com o novo plano cultural, que, para o ano chuvoso, nos meses chuvosos a retirada de água dos poços foi bem pequena quando comparado com os anos médio e seco, e que a partir do mês de junho a retirada foi igual, independente do cenário climático. Observa-se, também, que, apesar de no ano seco, período de safra, ser irrigada uma área bem menor do que no ano médio, o complemento da necessidade hídrica das culturas a serem irrigadas parece ser igual ou maior do que o do ciclo médio, devido a baixa pluviometria deste período.

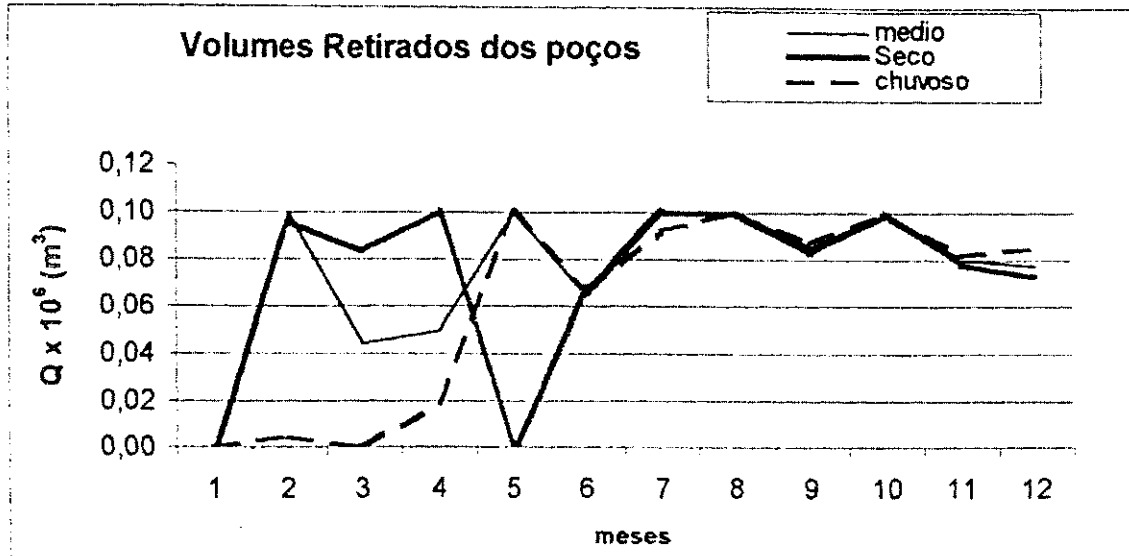


Figura 5.7 – Gráfico dos volumes retirados dos poços para a irrigação com o novo plano cultural, quando feito uso apenas da água dos poços.

Quando otimizado para o período seco com o novo plano cultural, em que a água usada na irrigação foi retirada do reservatório e do aquífero, porém com a capacidade deste limitada para 1/3 das reservas, obteve-se um pequeno aumento na área total alocada em torno de 3,75% enquanto que na receita líquida ocorreu um aumento de 4,78% (Ver Tabela 5.32) em relação a otimização realizada com o plano cultural padrão (Tabela 5.22), nas mesmas condições de limitação da capacidade do aquífero a 1/3 da reserva. Isso mostra que, para essa situação, o planejamento cultural não tem fortes influências porque a disponibilidade hídrica encontra-se bastante limitada.

Tabela 5.32 – Resultados da otimização para o período seco com a capacidade do aquífero em 1/3 da reserva para o novo plano cultural.

Cultura	seco (Reservatório + 1/3 reserva)
banana	60
tomate safra	60
tomate entre	4,88
goiaba	0
melancia s	40
melancia ent	40
melão s	40
melão ent	40
feijão s	0
feijão ent	0
milho s	0
milho ent	0
algodão s	0
algodão ent	0
arroz s	0
arroz ent	0
área (safra)	200
área (entressafra)	144,88
área (total)	284,88
receita líquida (R\$)	2,85*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	194,57

### 5.2.9 – Análise do cenário C9

Neste cenário, o enfoque deixa de ser a maximização da receita líquida para ser a maximização da mão de obra.

Conforme a Tabela 5.33 que mostra os resultados obtidos com a maximização da mão de obra vemos um pequeno aumento nas áreas plantadas em relação ao cenário C2-A, em que foi maximizada a receita líquida. Para este cenário está se fazendo uso da água do reservatório e dos poços para a irrigação e 20 hs de bombeamento.

O aumento na área total plantada no período médio foi de 6,89%, no período seco foi 18,24%. Para o período chuvoso não houve variação.

No período médio o número de diárias aumentou em 1,92% em relação ao cenário em que se maximizou a receita líquida (Ver Tabela 5.17). Para o período chuvoso não

ocorreu variação pois não houve aumento da área irrigada. No ano seco observa-se o maior incremento do número de empregos gerados, em torno de 5,25%. Entretanto, a diminuição na receita líquida é pequena: 3,77% e 8,78% para os períodos médio e seco, respectivamente.

Quando feito uso da água apenas do reservatório, os resultados obtidos com a maximização da mão de obra para a área total plantada (Tabela 5.34) foi bem maior que aquele alcançado com a maximização da receita líquida (Tabela 5.18): 15,80% maior para o ano médio e 26,48% para o ano seco. Entretanto no ano chuvoso o aumento foi de apenas 1,80% da área total plantada. Com isso o aumento no número de diárias geradas por ano foi de 7,76%, 6,87% e 1% para os períodos médio, seco e chuvoso, respectivamente. As receitas líquidas diminuíram em 2,81% no ano médio, 9% no ano seco e 0,57% no ano chuvoso.

Tabela 5.33 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização em que se maximizou a mão de obra, fazendo-se uso da água dos poços e reservatório, com 20 hs de bombeamento

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	50	21,34	60
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	60	39,55	60
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	40	40	40
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	0	28,66	0
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	40	40	0
algodão entressafra	25,51	0	0
arroz safra	0	0	30
arroz entressafra	0	0	30
área (safra)	230	230	230
área (entressafra)	215,51	140,89	230
<b>área (total)</b>	<b>395,51</b>	<b>349,55</b>	<b>400,00</b>
<b>receita líquida (R\$)</b>	<b><math>3,32 \cdot 10^6</math></b>	<b><math>2,70 \cdot 10^6</math></b>	<b><math>3,52 \cdot 10^6</math></b>
<b>diárias/ano</b>	<b><math>6,89 \cdot 10^4</math></b>	<b><math>5,61 \cdot 10^4</math></b>	<b><math>7,09 \cdot 10^4</math></b>

Tabela 5.34 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização em que se maximizou a mão de obra, fazendo-se uso da água do reservatório, com 20 hs de bombeamento

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	36,45	0	60
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	60	29,26	60
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	40	40	40
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	13,55	50	0
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	40	40	0
algodão entressafra	0	0	14,32
arroz safra	0	0	30
arroz entressafra	0	0	15,68
área (safra)	230	230	230
área (entressafra)	176,45	109,26	230
área (total)	370,00	339,26	400,00
receita líquida (R\$)	3,11*10 <sup>6</sup>	2,32*10 <sup>6</sup>	3,49*10 <sup>6</sup>
diárias/ano	6,39*10 <sup>4</sup>	4,98*10 <sup>4</sup>	7,09*10 <sup>4</sup>

Fazendo-se uso apenas dos poços, os resultados obtidos (Tabela 5.35) com a maximização da mão de obra, praticamente não apresentaram diferenças em relação as alocações das áreas das culturas, receitas líquidas obtidas e diárias geradas com a maximização da receita líquida, para os períodos médio e seco. As variações ficaram em torno de 0,5%, devido aos limites de disponibilidade de água, por se trabalhar apenas com poços. Para o período chuvoso, em que há uma maior disponibilidade hídrica, ocorreu uma ligeira modificação nas culturas alocadas, comparando-se com os resultados da Tabela 5.21, em que se maximizou a receita líquida, chegando-se a irrigar 11,75 ha da banana, que é uma cultura permanente. Com isso, ocorreu um incremento no número de diárias obtidas de 2,63% apesar da área total plantada ter diminuído em 4,2%, mostrando que, quando se maximiza a mão de obra, as áreas por culturas são estabelecidas de acordo com requerimento de mão de obra para o cultivo destas culturas.

Tabela 5.35 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização em que se maximizou a mão de obra, fazendo-se uso da água dos poços, com 20 hs de bombeamento

Cultura	médio	seco	chuvoso
banana	0	0	11,75
tomate safra	42,96	0	60
tomate entressafra	2,37	2,37	0
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	24,39	40
melancia entressafra	0	0	0
melão safra	40	40	40
melão entressafra	18,71	18,71	11,51
feijão safra	12,61	0	60,64
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	17,61
algodão entressafra	0	0	0
arroz safra	0	0	0
arroz entressafra	0	0	0
área (safra)	135,57	64,39	230
área (entressafra)	21,08	21,08	23,26
área (total)	156,65	85,47	241,51
receita líquida (R\$)	$1,30 \cdot 10^6$	$9,62 \cdot 10^6$	$1,45 \cdot 10^6$
diárias/ano	$2,48 \cdot 10^4$	$1,14 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^4$

### 5.2.10 – Análise do cenário C10

Neste cenário, a otimização foi realizada maximizando uma terceira função objetivo, obtida a partir de pesos atribuídos para as funções objetivo: maximização da receita líquida e maximização da mão de obra. Os pesos atribuídos as funções objetivo foram os seguintes:

- 50% para a receita líquida e 50% para a mão de obra (Situação 1)
- 70% para a receita líquida e 30% para a mão de obra (Situação 2)
- 30% para a receita líquida e 70% para a mão de obra (Situação 3)

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.36, a seguir:



Tabela 5.36 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização para a terceira função objetivo, fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento e valores médios mensais de precipitação e vazão.

Cultura	Situação 1	Situação 2	Situação 3
	50%RL e 50%MO	70%RL e 30%MO	30%RL e 70%MO
banana	60	60	60
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	60	60	60
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	40	40	40
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	1,78	1,78	0
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	30
algodão entressafra	0	0	10,85
arroz safra	28,22	28,22	0
arroz entressafra	0	0	0
área (safra)	230	230	230
área (entressafra)	200	200	210,85
área (total)	370,00	370,00	380,85
receita líquida (R\$)	$3,44 \cdot 10^6$	$3,44 \cdot 10^6$	$3,44 \cdot 10^6$
diárias/ano	$6,76 \cdot 10^4$	$6,76 \cdot 10^4$	$6,87 \cdot 10^4$
área máx. mensal	230	230	230

Conforme os resultados observa-se que a receita líquida não apresentou variação para as diferentes situações. Um pequeno aumento no número de diárias obtidas ocorreu para a situação 3 em que atribui-se um peso de 70% para a maximização da mão de obra. As áreas irrigadas por cultura na situação 3 apresenta-se com pequenas diferenças em relação as demais situações: não alocou-se o arroz safra e alocou-se o algodão safra e entressafra, obtendo-se uma maior área irrigada em 5,4% e o incremento no número de diárias foi de 1,63%.

No entanto, a situação 3 apresenta valores menores de diárias geradas e de área plantada em relação ao ano médio do cenário C9 (Tabela 5.33), em que se maximizou apenas a mão-de-obra. Com relação a receita líquida, na situação 3 ocorreu um pequeno aumento de 3,61%, já que é atribuído um peso de 30% para a receita líquida em relação ao cenário C9.

Em relação ao ano médio do cenário C2-A (Tabela 5.17), a situação 3 apresenta um pequeno aumento no número de diárias de 1,63% e na área plantada de 2,93%, pois atribuiu-se um peso de 70% para a mão de obra, enquanto que no cenário C2-A maximizou-se apenas a receita líquida. Porém, devido ao peso atribuído para a receita líquida ter sido de apenas 30% na situação 3, esta apresenta-se menor, em relação ao ano médio do cenário C2-A.

### 5.2.11 – Análise do cenário C11

Neste cenário buscou-se encontrar o volume inicial ótimo do reservatório para os anos médio, seco e chuvoso, quando feito uso da água do reservatório e dos poços para a irrigação. O volume inicial ótimo é aquele para o qual obtém-se a maior receita líquida para o sistema, ao final do período determinado para a sua operação, que neste caso é de um ano. A receita líquida tende a crescer a medida que se trabalha com volumes iniciais maiores para o reservatório porque ocorre uma maior disponibilidade de água para o perímetro, até chegar a um ponto em que essa disponibilidade começa a diminuir devido a restrição de sustentabilidade hídrica estabelecida, na qual o volume do reservatório no final do período de sua operação deve ser maior ou igual ao inicial.

A Tabela 5.37 apresenta as receitas obtidas para diferentes volumes iniciais, nos períodos médio, seco e chuvoso.

Tabela 5.37 – Receitas líquidas em R\$ obtidas com a otimização realizada para diferentes volumes iniciais do reservatório, fazendo-se uso do reservatório e poços, com 20hs de bombeamento

Volumes x 10 <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> )	Receita Líquida x 10 <sup>6</sup> (R\$)		
	médio	seco	chuvoso
14000	3,48	1,63	3,52
15000	3,47	2,17	3,52
16000	3,46	2,60	3,52
17000	3,45	2,96	3,52
18000	3,44	3,27	3,52
19000	3,40	3,45	3,52
20000	3,35	3,49	3,52
21000	3,30	3,50	3,52
22000	3,24	3,50	3,52
23000	3,19	3,50	3,52
24000	3,14	3,50	3,52

O volume inicial ótimo, ou seja, aquele que corresponde a maior receita líquida é de 14.000.000 m<sup>3</sup> para o ciclo médio, conforme a Figura 5.8. A medida que o volume inicial vai aumentando, ocorre a redução da receita líquida devido a diminuição da área irrigada, porque é diminuída a disponibilidade de água para a irrigação para que o volume inicial seja assegurado no final do processo de otimização.

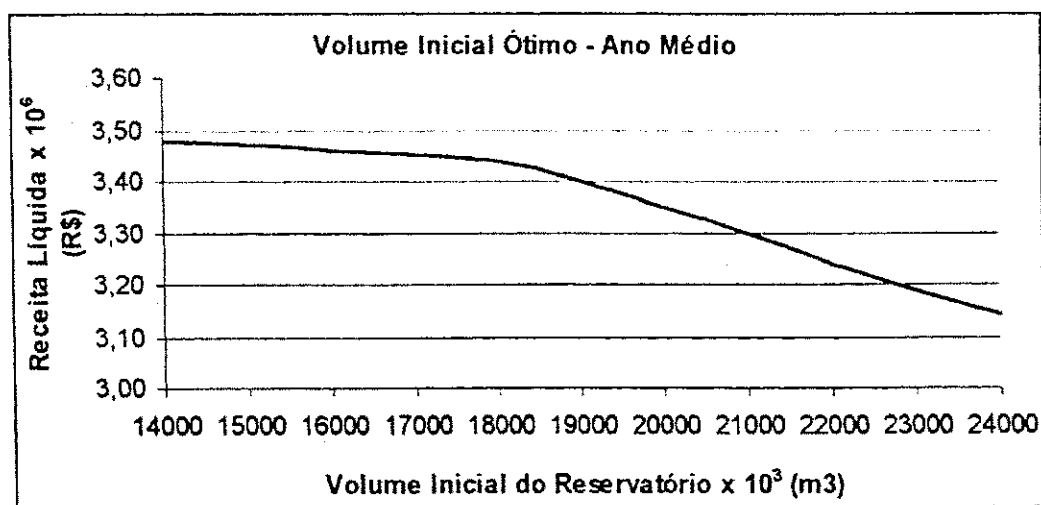


Figura 5.8 – Volume inicial ideal para a operação do reservatório – ano médio

Para o período seco, não é possível utilizar a restrição de sustentabilidade hídrica,

devido aos limites de disponibilidade deste período, conforme já explicado no início deste capítulo. Entretanto, assegurou-se neste caso o volume mínimo de 10.000.000 m<sup>3</sup> mensais, que garante as demandas das cidades de Condado e Malta e que não deve ser usado para a irrigação. Com isso, conforme observa-se na Figura 5.9, a receita vai aumentando à medida que aumenta-se o volume inicial, pois tem-se mais água para se irrigar. Contudo, a partir de 21.000.000 m<sup>3</sup>, não há mais variação da receita líquida, pois com este valor de volume inicial é alocada a área máxima disponível, 230 ha, para os períodos de safra e entressafra.

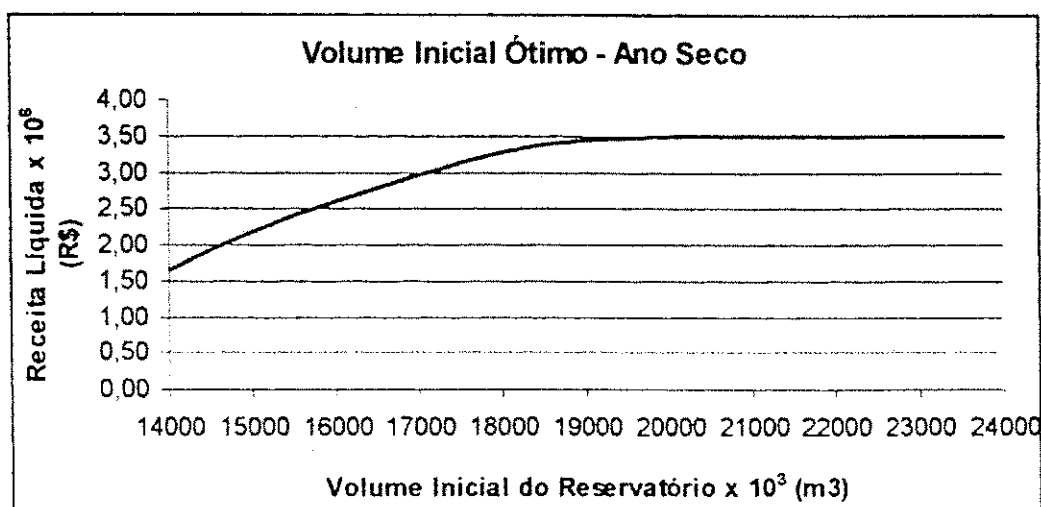


Figura 5.9 – Volume inicial ideal para a operação do reservatório – ano seco, sem critério de sustentabilidade hídrica

Devido a suficiente quantidade de água existente no período chuvoso, tanto para atender as demandas de abastecimento das cidades de Condado e Malta, como as da irrigação, observa-se que para diferentes valores de volumes inicial do reservatório, a sustentabilidade hídrica é facilmente assegurada, irrigando-se sempre as áreas máximas para as culturas que fornecem o maior retorno financeiro, obtendo-se sempre a mesma receita líquida conforme a Figura 5.10, a seguir.

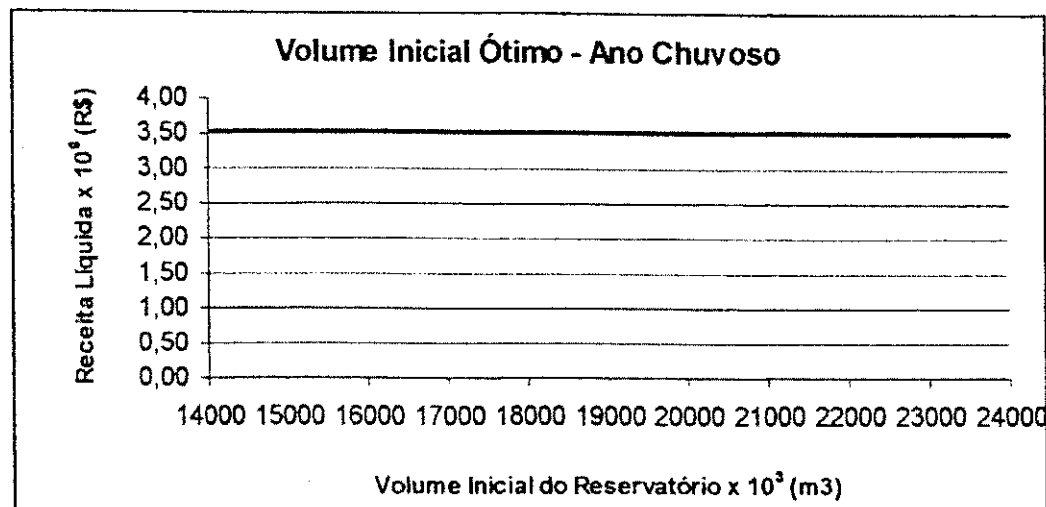


Figura 5.10 – Volume inicial ideal para a operação do reservatório – ano chuvoso

### 5.2.12 – Análise do cenário C12

Este cenário visa avaliar o consumo de água e quantificar os benefícios que uma mudança de método de irrigação pode trazer para as áreas irrigadas.

A escolha do método de irrigação a ser usada em cada área, deve ser baseada na viabilidade técnica e econômica do projeto. Em geral, os sistemas de irrigação por superfície são os de menor custo por unidade de área, os de aspersão de custo médio e os de gotejamento, de maior custo.

Na escolha do método de irrigação a ser usado, devem-se considerar os seguintes pontos: uniformidade da superfície do solo, tipo do solo, quantidade e qualidade da água, clima, cultura e manejo da irrigação (Christofidis, 1999).

A irrigação por superfície compreende os métodos de irrigação nos quais a condução de água do sistema de distribuição (canais ou tubulações) até qualquer ponto de infiltração, dentro da parcela a ser irrigada, é feita diretamente sobre a superfície do solo.

Os métodos de irrigação por superfície são:

- Irrigação por sulco: este método consiste na condução de água em pequenos canais ou sulcos situados paralelos às fileiras das plantas, durante o tempo necessário para

que a água, infiltrada ao longo do sulco, seja suficiente para manter o solo, na zona radicular da cultura, umedecido.

- Irrigação por faixa: é o método de aplicação de água ao solo por meio de faixas de terreno compreendidos entre diques paralelos.

- Irrigação por inundação: é o método de irrigação em que a aplicação d'água é feita por meio de bacias ou tabuleiros.

A irrigação por gotejamento permite aplicações freqüentes de pequenas quantidades de água (um a dez litros por hora), diretamente sobre a região radicular, de modo que mantenha a umidade do solo na zona radicular próximo à “Capacidade de Campo”.

A irrigação por aspersão é um método de aplicação de água, por meio de dispositivos especiais, em forma de chuva artificial, abastecidos com água sob pressão. Estes dispositivos especiais, chamados de aspersores, têm a função de pulverizar os jatos de água, que saem das tubulações, e devem assegurar uma distribuição adequada da precipitação que cai sobre a superfície do terreno cultivado.

À partir de observações a nível mundial, as faixas de eficiência e de vazão específica por cada método de irrigação, aplicáveis no caso brasileiro, conforme Christofidis (1999), são os seguintes (Tabela 5.38):

Tabela 5.38 – Métodos de Irrigação, eficiência e vazões específicas

Método de Irrigação	Eficiência (%)	Vazão Específica (l/s/ha)
por superfície	40 a 65	1,2 a 2,5
por aspersão	70 a 85	0,9 a 1,2
gotejamento	90 a 95	0,6 a 0,9

Fonte: Christofidis (1999)

A eficiência dos sistemas de irrigação podem ser maiores ou menores dependendo da qualidade de fabricação dos mesmos, do turno de irrigação (diurno ou noturno) devido

as perdas por evaporação e da manutenção apropriada nos sistemas de irrigação, entre outros (Gomes, 1999). A eficiência de cada sistema de irrigação usada no modelo de otimização, encontra-se na Tabela 5.14 deste capítulo.

Para a verificação da variação da receita líquida e do consumo de água que ocorre com a mudança nos métodos de irrigação, foram criadas mais duas situações para serem comparadas com a situação 1, que é considerada padrão e que foi utilizada em todas os demais cenários. Este teste foi feito com os dados médios mensais de precipitação e vazão, fazendo-se uso da água do reservatório e poços para a irrigação. A Tabela 5.39 abaixo, mostra os sistemas de irrigação adotados por cultura para cada situação.

Tabela 5.39 – Sistemas de irrigação por cultura adotado para cada situação

Culturas	Situação 1	Situação 2	Situação 3
banana nanicão	gotejamento	aspersão	sulco
tomate	sulco	sulco	sulco
goiaba	gotejamento	aspersão	sulco
melancia	gotejamento	aspersão	sulco
melão japonês	gotejamento	sulco	sulco
feijão	aspersão	aspersão	sulco
milho	aspersão	aspersão	sulco
algodão	aspersão	aspersão	sulco
arroz	sulco	sulco	sulco

Observa-se pelos resultados obtidos (Tabela 5.40), que ocorreu em relação a situação 1, que é a situação padrão (Tabela 5.17), uma redução na área total plantada de 15,8% e 19% para as situações 2 e 3, respectivamente. Em relação a receita líquida ocorreu também um déficit de 9,85% e 19,42% para as situações 2 e 3, respectivamente, em relação a situação 1. Isso mostra que o gotejamento, por ser mais eficiente (95%), disponibiliza mais água e pode irrigar mais, fornecendo uma maior receita. Quando adotado o sulco para todas as culturas, na situação 3, a receita diminui significativamente, por ser um sistema que tem uma eficiência de apenas 50%. A irrigação por sulco não é adequada para a grande maioria das culturas escolhidas, principalmente por sua baixa eficiência. Existe autores que adotam apenas 40% de eficiência para a irrigação por sulco.

Tabela 5.40 – Áreas por cultura em ha e receita líquida obtida com a otimização para diferentes sistemas de irrigação adotados por cultura, fazendo-se uso da água do reservatório e poços, com 20 hs de bombeamento e dados médios mensais de precipitação e vazão

Cultura	Situação 1	Situação 2	Situação 3
banana	60	60	19,68
tomate safra	60	60	60
tomate entressafra	60	31,53	60
goiaba	0	0	0
melancia safra	40	40	40
melancia entressafra	40	40	40
melão safra	40	40	40
melão entressafra	40	40	40
feijão safra	1,78	0	0
feijão entressafra	0	0	0
milho safra	0	0	0
milho entressafra	0	0	0
algodão safra	0	0	0
algodão entressafra	0	0	0
arroz safra	28,22	0	0
arroz entressafra	0	0	0
área (safra)	230	200	159,68
área (entressafra)	200	171,53	159,68
área (total)	370,00	311,53	299,68
receita líquida (R\$)	3,45*10 <sup>6</sup>	3,11*10 <sup>6</sup>	2,78*10 <sup>6</sup>
área máx. mensal	230	200	159,68

Em relação ao consumo de água, observa-se pela Figura 5.11, que na situação 1, em que a banana, o melão e a melancia são irrigadas por gotejamento, menores volumes são retirados do reservatório em relação as demais situações, no período de entressafra. Com isso, observa-se o menor consumo de água, e uma maior área irrigada. Para a situação 3, onde todas as culturas são irrigadas por sulco, tem-se a menor área irrigada e os maiores valores de volumes de água extraídos do reservatório.



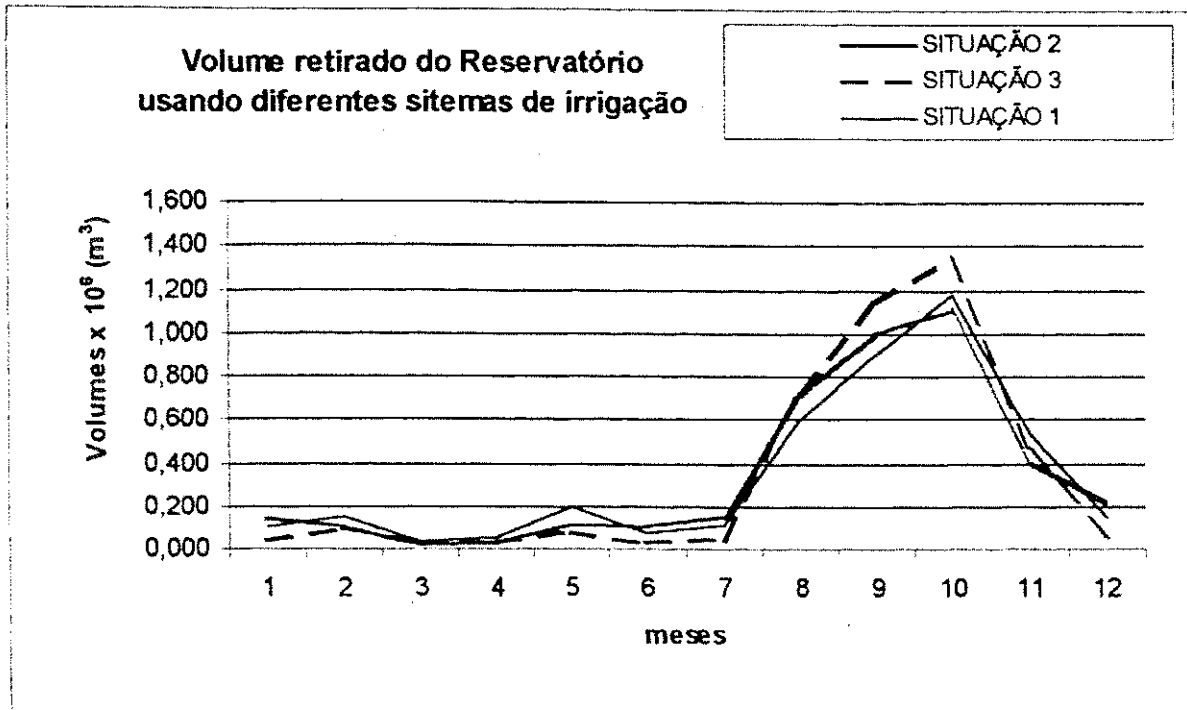


Figura 5.11 – Gráfico dos volumes retirados do reservatório para diferentes situações em relação a variações nos sistemas de irrigação usados.

### 5.2.13 – Análise do cenário C13

A Tabela 5.41 mostra o quanto varia a receita líquida a medida em que é alterado o preço da água, nos anos médio, seco e chuvoso. Para um aumento de 66,7% no preço da água extraída do reservatório, ocorreu um déficit de 1,16%, 1,01% e 1,14% para os anos médio, seco e chuvoso, respectivamente. Quando o preço da água aumentou de R\$ 0,012 para R\$ 0,050 por m<sup>3</sup> de água, ou seja, 316,7%, os déficits na receita líquida foram de 4,64% para o ano médio, 4,39% para o ano seco e 5,11% para o ano chuvoso.

Com isso, observa-se que variações no preço da água não provocam grandes mudanças no valor da receita líquida, em razão do valor cobrado ser muito baixo, contribuindo apenas com uma pequena parcela na composição dos custos.

Tabela 5.41 – Receitas líquidas em R\$ obtidas com a otimização realizada para diferentes preços da água retirada do reservatório, fazendo-se uso do reservatório e poços, com 20hs de bombeamento e com valores médios mensais de precipitação e vazão

Preço da água/1000m <sup>3</sup>	Receita Líquida x 10 <sup>6</sup> (R\$)		
	médio	seco	chuvoso
R\$ 12,00	3,45	2,96	3,52
R\$ 20,00	3,41	2,93	3,48
R\$ 50,00	3,29	2,83	3,34

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 6.1 - CONCLUSÕES

Através de estudos de otimização do planejamento agrícola do perímetro irrigado de Condado para diversos cenários, pode-se concluir que:

- O CISDERGO é uma eficiente ferramenta no fornecimento de subsídios para um gerenciamento da operação de reservatórios e de perímetros irrigados, mostrando-se eficiente na determinação de receitas geradas com a otimização das áreas irrigadas e no manejo adequado de mananciais.
- A sustentabilidade hídrica do reservatório exerce grande influência na alocação das áreas das culturas e nas receitas líquidas obtidas, já que ela limita a quantidade de água a ser disponibilizada para a irrigação, de acordo com o volume inicial do reservatório e o período climático em que este está operando.

- É de grande importância a exploração planejada do aquífero aluvial de Condado para a sua utilização conjunta com a água do reservatório na irrigação, principalmente no período seco, por proporcionar uma maior rentabilidade ao perímetro.
- Esse trabalho confirma que é necessário uma escolha adequada das culturas e das áreas a serem plantadas nos períodos de safra e entressafra, de acordo com a situação climática, possibilitando um melhor aproveitamento do sistema, obtendo-se uma maior renda e evitando o uso inadequado da água.
- As culturas perenes devem ser planejadas à luz dos períodos secos para que as suas necessidades hídricas sejam sempre supridas, independente da variação climática que venha a ocorrer.
- É possível se fazer um bom planejamento cultural quando considera-se dois anos secos, pois com a ocorrência de até quatro anos secos consecutivos, não ocorreu grandes alterações na área total a ser plantada, obtida com a otimização.
- As mudanças realizadas nos sistemas de irrigação adotados mostraram a importância do uso de sistemas mais eficientes e do emprego destes de acordo com as características das culturas a serem irrigadas por proporcionar ao perímetro de irrigação uma maior rentabilidade, tendo em vista que foi considerado o custo de implantação e a vida útil de cada sistema de irrigação, como também uma maior área cultivada e menor consumo de água.
- O volume inicial ótimo deve ser escolhido de acordo com as condições climáticas do período de operação do reservatório. Para um período chuvoso, o volume inicial não influenciou nos resultados obtidos com a otimização em que se maximizou a receita líquida.
- Os limites das áreas máximas por cultura determinadas nas restrições do modelo influenciam nas alocações das culturas, devendo-se estabelecê-los de forma a permitir uma maior flexibilidade do modelo na escolha das áreas, proporcionando um maior retorno financeiro.
- A otimização realizada para maximizar o número de empregos gerados com o

cultivo das culturas, não reduz significativamente a receita líquida em relação aquela obtida quando esta é maximizada.

- Para situações em que se limitou a disponibilidade do aquífero a 1/3 da sua reserva, as mudanças no plano cultural não exerceram fortes influências na área total irrigada e na receita líquida porque a disponibilidade hídrica é bastante limitada.
- Um aumento de 316,7% no preço da água não diminuiu significativamente a receita líquida. O valor da água cobrado é extremamente baixo, apesar do seu alto valor para a região, sobretudo por ser um recurso escasso.
- Quando trabalhou-se com séries plurianuais de 2, 3, 4 e 5 anos, representativas de anos secos, observou-se que as áreas alocadas e a receita líquida obtidos com a otimização são sensíveis à ocorrência de maiores precipitações e afluxos no início da série (primeiro ano).
- Reduções a partir de 20% nas vazões afluentes ao reservatório Engenheiro Arcoverde, mesmo em um ano de precipitações em torno da média, leva o sistema a resultados menos favoráveis do que os obtidos em ano seco, em termos de área total irrigada e receita líquida.
- O CISDERGO também mostrou-se eficiente na maximização de funções multiobjetivo, fornecendo com isso subsídios para tomadores de decisão que desejam atender aos anseios tanto econômicos (maximização da receita líquida) como sociais (maximização da mão de obra) em regiões que usufruem de perímetros irrigados.

## 6.2 – RECOMENDAÇÕES

Como recomendações ressalta-se a necessidade de:

- Testar o sistema para o ano seco com lâminas de irrigação variáveis e de acordo com a função de produção ou resposta de cada cultura.
- Testar o sistema fazendo-se um balanço hídrico real, a nível mensal do aquífero.
- Considerar o preço da água extraída do aquífero.
- Verificar o valor do preço da água que passaria a causar diminuição significativa na receita líquida.
- Testar uma maior variedade de culturas.
- Estudar outros cenários, fazendo-se a otimização para funções multiobjetivo, investigando de forma mais aprofundada o comportamento não linear observado no problema, quando atribui-se pesos às funções objetivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J. P. T., GÓIS, R. S. S., RÊGO, J. C. 1998, Os Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos do Estado da Paraíba: Uma Abordagem Quanti-Qualitativa. *Anais do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Campina Grande-PB, 1998, CD-ROM.
- ATECEL/SEPLAN/PB 1994, Disponibilidade Hídrica Superficial. *Plano Estadual e Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos*, 1994.
- ATECEL/UFPB 1998, Estudos Hidrológicos do Açude Engenheiro Arcoverde, Relatório Técnico.
- ATLAS CLIMATOLÓGICO DO ESTADO DA PARAÍBA 1987. Governo do Estado da Paraíba, Universidade Federal da Paraíba. Núcleo de Meteorologia Aplicada, 2ª Edição, Campina Grande-PB, 1987.
- AYERS, R. S. e WESTCOT, D. W. 1985, Water Quality for Agriculture. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage paper 29*, Ser. 1, 1985.
- BARBOSA, P. S. F. 1997a, Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, Ed. da Universidade UFRGS, ABRH, Cap. 3, p. 97-161.
- BARBOSA, P. S. F. 1997b, O Emprego da Análise Multiobjetivo no Gerenciamento dos Recursos Hídricos. *A Água em Revista*, ano V, N. 8, março 1997, p. 42-46.
- BARROS, M. T. L., BRAGA JR., B. P. F. 1991, Otimização Estocástica Implícita da Operação de Sistemas de Reservatórios considerando múltiplos objetivos. *Revista Brasileira de Engenharia*, V. 9, N. 1, 1991.
- BARTH, F. T. 1987, Fundamentos para Gestão de Recursos Hídricos. *Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos*, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, V.1, Ed. Nobel/ABRH, Cap. 1, p. 1-91.

BIANCO, A., TONSO, E. J., TEIXEIRA, H. J. 1987, A Utilização da Programação Linear para Auxiliar na Tomada de Decisão de Caráter Operativo em Tempo Real. *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, ABRH, Salvador, V.1.

BRAGA JR., B. P. F. 1987, Técnicas de Otimização e Simulação aplicados em Sistemas de Recursos Hídricos. *Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos*, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, V.1, Ed. Nobel/ABRH, Cap. 5, p. 427-518.

BRAGA JR., B. P. F., GOBBETTI, L. C. 1997, Análise Multiobjetivo. *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, Ed. da Universidade UFRGS, ABRH, Cap. 7, p. 361-420.

BRAGA, B. P. F., BARBOSA, P. S. F., NAKAYAMA, P. T. 1998, Sistemas de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos. *Revista Brasileiro de Recursos Hídricos*, V. 3, N. 3, Julho/Setembro 1998, p.73-95.

BURMAN, G., GÓIS, Z., M., A. 1992, Uso da Programação Linear no Planejamento da Agricultura Irrigada. *Anais do IX Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem*, Natal – RN, v. 2, p. 1833-1855.

CHIANG, A. C. 1982, *Matemática para Ecossistemas*, São Paulo, McGraw Hill, p. 684. Citado em Cunha (1999).

CHRISTOFIDIS, D. 1999, Situação das Áreas Irrigadas, Métodos e Equipamentos. *Anais do Ciclo de Palestras da Secretaria*, 1997-1999, MME e SRH, Brasília, 1999, p. 19-40.

COHON, J. L., CHURCH, R. L., SHEER, D. 1979, Generating Multiobjective Trade-Offs: An Algorithm for Bicriterion Problems. *Water Resources Research*, V.15, N. 5, p. 1001-1010.

COHON, J. L., MARKS, D. H. 1975, A Review and Evolution of Multiobjective Programming Techniques. *Water Resources Research*, V.11, N. 2, p. 208-220.

CUNHA, R. G. L. 1999, *Operação Integrada do Reservatório Engenheiro Arcoverde, Poços Amazonas e Perímetro Irrigado de Condado – PB, Utilizando-se de Programação Linear*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB.



- CURI, W. F., CURI, R. C. 1998, Otimização Integrada do Reservatório Engenheiro Arcoverde e do Perímetro Irrigado da cidade de Condado - PB. *Anais do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, ABRH, Campina Grande-PB, 1998, CD-ROM.
- CURI, W. F., CURI, R. C. 1999, Publicação Técnica do Departamento de Física, CCT – UFPB, Campina Grande-PB.
- DINIZ, L. S., GÓIS, R. S. S. 1993, Aplicação de um algoritmo para calibração automática de modelos chuva vazão. *Anais do X Simpósio Brasileiro Recursos Hídricos*, ABRH, Gramado, V.3, p. 116-125.
- DOORENBOS, J. e KASSAM, A. H. 1979, *Efeito da Água nos Rendimentos da Cultura*. Traduzido por H. R. Gheyi, A. A. de Souza, F. A. V. Damasceno e J. F. de Medeiros. Campina Grande, UFPB, 1994. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33, 360 p.
- FAO 1988, *Irrigation Water Needs*. Rome. Irrigation Water Management Training Manual 3.
- GATES, T. K., HEYDER, W. E., FONTANE, D. G., SALAS, J. D. 1991, Multicriterion Strategic Planning Improved Irrigation Delivery I: Approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, V. 117, N. 6, p. 897-913.
- GOBBETTI, L. E. C., BARROS, M. T. L. 1993, Análise Multiobjetivo aplicada ao Planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos. *Anais do X Simpósio Brasileiro Recursos Hídricos*, ABRH, Gramado, V.1, p. 317-326.
- GÓIS, R. S. S., SUZUKI, K. 1987, Runoff characteristics of small rivers in northeast Brasil. *Proc. 29th Japanese Conference on Hydraulics*, Tóquio, Japão, 1987.
- GOMES, H. P. 1999, *Engenharia de Irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados aspersão e gotejamento*. 3ª Edição. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB, 1999.
- HEYDER, W. E., GATES, T. K., FONTANE, D. G., SALAS, J. D. 1991, Multicriterion Strategic Planning Improved Irrigation Delivery II: Application. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, V. 117, N. 6, p. 914-934.

- HILLEL, D. 1971, Soil and Water, Physical Principles and Processes, Academic Press, 1971.
- LEVIEN, S. L. A. 2000, Importância do Manejo da Irrigação. *Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, ABRH, Natal-RN, 2000, CD-ROM.
- LIMA, J. E. F. W., FERREIRA, R. S. A., CHRISTOFIDIS, D. 1999, O Uso da Irrigação no Brasil. *O Estado das Águas no Brasil*, Organização Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, Brasília – DF: ANEEL, SIH; MMA, SRH; MME 1999, p. 73-82.
- MEDEIROS, Y. P., OCCHIPINTI, A. G. 1987, Aplicação de Programação Linear Inteira 0 (Zero) e 1 (Um) na otimização de sistemas de Recursos Hídricos a múltiplos propósitos. *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, ABRH, Salvador, v.1.
- MELLO JR., A. V., BRAGA JR., B. P. F. 1996, Análise Multiobjetivo Aplicada a um Sistema de Produção Agrícola. *Revista Brasileiro de Recursos Hídricos*, V. 1, N. 1, Janeiro/Junho 1996, p. 09-27.
- MELLO JR., A. V., BRAGA JR., B. P. F., ROCHA, J. C. S. 1997, Otimização Estocástica Linear aplicada à operação de reservatórios. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. ABRH, Vitória / ES, V.2, 1997.
- MOHAMMADI, E. M. 1998, Irrigation Planning: Integrated Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, V. 124, N. 5, September/October 1998.
- OLIVEIRA, J. A., LANNA, A. E. L. 1997, Otimização de um Sistema de Múltiplos Reservatórios Atendendo a Múltiplos Usos no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, V. 2, N. 2, Jul/Dez 1997, p. 123-141.
- OLIVEIRA, M. B. A. 2000, Estimativa dos Benefícios Econômicos do uso da água do Sistema Coremas/Mãe D'Água para a Irrigação nas Várzeas de Sousa. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB.
- PARAÍBA, GOVERNO DO ESTADO 1994, *Plano Estadual de Recursos Hídricos*, ATECEL/UFPB, Campina Grande-PB, 1994.

- PARAÍBA, GOVERNO DO ESTADO 1997, *Manual de Orçamentos Agropecuários*. CENOP-CDE-COVAT/Banco do Nordeste, Campina Grande-PB, 176 p.
- PILAR, J. V., SANTANA, A. G., LANNA, A. E. L. 1998, Uma Abordagem alternativa para a utilização da Programação Linear com curvas segmentadas no planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos. *Anais do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Campina Grande-PB, 1998, CD-ROM.
- RÊGO, J. C., ALBUQUERQUE, J. P. T. 1999, Estudos para Avaliação da Potencialidade e das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas na Área Aluvial do Perímetro Irrigado do Açude Público Eng. Arcoverde, município de Condado-PB, Relatório Técnico, ATECEL, UFPB, 1999, 20 p.
- RHOADES, J. D., MERRILL, S. D. 1976, Assessing the Suitability of Water for Irrigation: Theoretical and Empirical Approaches, *Prognosis of Salinity and Alkalinity*, Rome, FAO Soils Bulletin, N. 31, 1976, p. 69-110. Citado em Gomes (1999).
- ROEFS, T. G. 1967, Reservoir Management: State of the Art. *IBM Washington Scientific Center*, Wheaton, Maryland. Citado em Barros e Braga (1991).
- SUGAWARA, M. 1979, Automatic calibration of the TanK Model. *Hydrological Science Bulletin*. V. 24, N. 3, p. 375-358, 1979.
- TEIXEIRA, C. A., BARBOSA, P. S. F. 1995, Avaliação Multicriterial de Alternativas de Projeto de Barragens de Uso Múltiplo. *Anais do XI Simpósio Brasileiro Recursos Hídricos*, ABRH, Recife, V.1, p. 73-77.
- YEH, W. W-G. 1985, Reservoir Management and Operations Models: A State of the Art Review. *Water Resources Research*, V. 21, N. 12, December 1985, p. 1797-1818.