

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA DE UM
RESERVATÓRIO PARA FINS DE IRRIGAÇÃO**

Manoel Henrique da Nóbrega Marinho

Campinas

2002

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

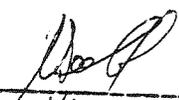
OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

Manoel Henrique da Nóbrega Marinho

Orientador: Prof. Dr. Renato Soliani

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.

Prof. Dr. 

Matrícula: 14924-1

20/03/02

Campinas, SP

2002

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE UNICAMP
Nº CHAMADA M338o
V EX
TOMBO BCI 49114
PROC 16-837/0e
C DX
PREÇO R\$ 11,00
DATA _____
Nº CPD _____

CM00167657-1

BIB ID 240598

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M338o Marinho, Manoel Henrique da Nóbrega
Otimização do uso da água de um reservatório para
fins de irrigação / Manoel Henrique da Nóbrega
Marinho.--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Renato Soliani.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Otimização matemática. 2. Abastecimento de
água. 3. Água de irrigação. 4. Cultivos agrícolas. 5.
Programação linear. I. Soliani, Renato.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

Manoel Henrique da Nóbrega Marinho

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Renato Soliani

Presidente e Orientador/FEC-UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Sergio Franco Barbosa

FEC-UNICAMP



Prof. Dr. José Antonio Frizzone

ESALQ-USP

Campinas, 06 de Março de 2002

200222342

Aos meus avôs *Manoel Marinho da Nóbrega (in memoriam)* e *Pedro Marinho da Nóbrega (in memoriam)*,

OFEREÇO

**Aos meus pais *Rui Vieira Marinho* e *Maria Auxiliadora da Nóbrega Marinho*,
razão maior de minha existência e que me fazem sentir a continuidade da vida que, com humildade, compreensão e amor direcionaram os caminhos de minha vida e aos meus irmãos, *Ana Cristina*, *Alexandre Magno* e *Giovanni Guisepe*,**

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus

“Todos na vida temos necessidade de *Alguém* que nos ajude a encontrar-nos com nossa experiência humana.

Todos na vida temos necessidade de *Alguém* que nos indique o caminho para encontrar nosso eu mais verdadeiro.

Todos na vida temos necessidade de *Alguém* que nos preceda nos estupendos e árduos caminhos de Deus.”

**Você é este Alguém.
Muito obrigado meu Deus!!!**

À Universidade Estadual de Campinas, através da Faculdade de Engenharia Civil, do Departamento de Recursos Hídricos pela oportunidade oferecida para a realização deste curso.

Ao Prof. Dr. *Renato Soliani*, pela eficiente e criteriosa orientação bem como pela amizade e incentivo dispensado durante todo este período acadêmico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas de Pós-Graduação, em especial aos de Recursos Hídricos, pela convivência e pelo companheirismo.

Ao colega Fernando Sérgio Amaral Coelho, pela humildade e compreensão prestada na minha chegada à Unicamp. Mostrando hospitalidade nas veias e no orgulho de ser nordestino.

À minha grande amiga Adma Raia.

Aos amigos(a), Rodrigo, Claudio, Teógenes, Irênio, Eudemario, Arismar, Lucas, Ericka, Conceição, Artur, Ângelo, Rogério, Mônica e Renata, pela colaboração e estímulo permanentes.

A eles e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram nesta tarefa,

AGRADEÇO.

**"Penso nas aventuras insignificantes da minha vida, nos meus
temores pequenos, porém grandes aos meus olhos.
Tantos foram os obstáculos que tive de superar,
para só agora perceber que existe um só motivo à razão de tudo:
viver para contemplar o amanhecer de um novo dia
e enxergar a luz que ilumina o mundo".**

(antiga canção esquimó)

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xvi
1 INTRODUÇÃO	01
2 OBJETIVO	05
2.1 Objetivos Gerais	06
2.2 Objetivos Específicos	06
3 REVISÃO DE LITERATURA	07
3.1 Introdução	07
3.2 Planejamento de Recursos Hídricos	09
3.2.1 Introdução	09
3.2.2 Usos Múltiplos da Água	11
3.3 Gerenciamento dos Recursos Hídricos	13
3.3.1 Análise de Sistemas e Engenharia de Recursos Hídricos	16
3.3.1.1 Conflitos de Uso da Água	17
3.3.1.2 Técnicas de Análise de Sistemas	19
3.3.1.3 Técnicas de Simulação	20
3.3.1.4 Técnicas de Otimização	21
3.3.1.5 Programação Linear	22
3.3.1.6 Programação Dinâmica	24

3.3.1.7 Programação Não-Linear	25
3.4 Situação Atual da Irrigação no Brasil	28
3.4.1 Irrigação: histórico e vantagens	31
3.4.2 Entraves e Limitações	33
3.4.3 Impactos Ambientais	34
3.5 Por que chove no semi-árido nordestino?	39
3.6 Resumo	41
4 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO	43
4.1 Localização, Extensão e Hidrografia	43
4.2 Clima	47
4.3 Temperatura	48
4.4 Umidade relativa do ar	48
4.5 Velocidade do Vento	49
4.6 Insolação	49
4.7 Evaporação	50
4.8 Regime Pluviométrico	51
4.9 Vegetação	55
4.10 Relevo	55
4.11 Solos	55
4.12 Reservatório Engenheiro Arcoverde	56
4.12.1 Dados técnicos	56
4.12.2 Perímetro de Irrigação de Condado	58
5 OS DADOS HIDROCLIMATOLÓGICOS DO SISTEMA EM ESTUDO	63
5.1 Introdução	63
5.2 Dados Hidrológicos de Entrada do Modelo	64
5.2.1 Balanço Hídrico do Reservatório Engenheiro Arcoverde	64
5.2.1.1 Volume observado do reservatório	64
5.2.1.2 Volume precipitado sobre o reservatório	70
5.2.1.3 Volume evaporado do reservatório	71
5.2.1.4 Volume efluente devido as demandas das cidades de Condado, Malta e o Perímetro de Irrigação	72

5.2.1.5 Volume afluente ao reservatório	72
5.2.1.5.1 Modelo -Tank Model	72
5.2.2 Balanço Hídrico das Culturas	76
5.2.2.1 Evapotranspiração da cultura	76
5.2.2.2 Coeficiente de Cultivo	78
5.2.2.3 Precipitação Efetiva	80
6 O MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR DETERMINÍSTICO	81
6.1 Generalidades	81
6.2 Enfoque do Problema	82
6.3 Necessidade de Água das Culturas	83
6.4 Formulação do Modelo	83
6.5 Análises Comparativas	89
6.5.1 Análise comparativa da área de cultivo	89
6.5.2 Análise comparativa do volume observado	90
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
7.1 Análises Comparativas	96
7.1.1 Análise comparativa da área de cultivo	96
7.1.2 Análise comparativa do volume observado	100
CONCLUSÕES	103
RECOMENDAÇÕES	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ABSTRACT	113
APÊNDICE	115

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 4.1 - Delimitação do “Polígono das Secas” no espaço físico brasileiro, com os respectivos Estados.	44
Figura 4.2 - Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba, destacando a Bacia Hidrográfica do Médio Piranhas.	45
Figura 4.3 - Bacia Hidrográfica do Médio Piranhas.	46
Figura 4.4 - Bacia Hidrográfica do reservatório Engenheiro Arcoverde.	47
Figura 4.5 - Reservatório Engenheiro Arcoverde.	60
Figura 4.6 - Canais de Irrigação.	60
Figura 4.7 - Perímetro Irrigado.	61
Figura 4.8 - Vista do município de Condado e do perímetro irrigado.	61
Figura 5.1 - Volumes ao fim de cada mês observado no reservatório para o período de 1974 – 1980, em m ³ .	66
Figura 5.2 - Volume Médio Anual Observado entre 1973 e 1983.	67
Figura 5.3 - Curva Cota x Volume do reservatório Engenheiro Arcoverde.	68
Figura 5.4 - Curva Cota x Área do reservatório Engenheiro Arcoverde.	69
Figura 5.5 - Esquema de representação dos tanques fictícios alinhados verticalmente.	73
Figura 5.6 - Esquema de representação dos diversos extratos do solo.	73
Figura 5.7 - Gráfico da lâmina escoada gerada pelo modelo Tank Model (mm).	75

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 4.1 - Temperatura Mínima, Máxima e Média (°C).	48
Tabela 4.2 - Umidade relativa do ar (%) - Posto de Patos - PB.	49
Tabela 4.3 - Distribuição média mensal de evaporação, período de 1963 à 1983.	50
Tabela 4.4 - Precipitação média mensal da bacia hidrográfica do açude Engenheiro Arcoverde (1963 - 1983).	51
Tabela 4.5 - Precipitação mensal no posto de Condado (mm), no período de 1973 - 1991.	52
Tabela 4.6 - Precipitação mensal no posto de Malta (mm), no período de 1973 - 1991.	53
Tabela 4.7 - Precipitação média mensal na bacia hidrográfica do reservatório Engenheiro Arcoverde (mm), no período de 1973 - 1991.	54
Tabela 4.8 - Seções dos canais de irrigação.	58
Tabela 5.1 - Volume ao fim de cada mês observado no reservatório para o período de 1974 - 1980 em m ³ .	65
Tabela 5.2 - Precipitação mensal do posto de Condado (mm) no período de 1974 - 1980.	70
Tabela 5.3 - Evaporação corrigida (mm) observada em Tanque Classe A na estação de Patos, no período de 1974 - 1980.	71
Tabela 5.4 - Lâmina escoada gerada pelo modelo Tank Model (mm) no período de 1973 - 1991.	74
Tabela 5.5 - Coeficientes de cultivo de cada cultura por período.	79

Tabela 6.1	- Produtividade, preços e custos de cada cultura.	83
Tabela 6.2	- Plantação mensal das culturas.	87
Tabela 6.3	- Áreas máximas e mínimas das culturas e o preço de venda.	87
Tabela 6.4	- Séries históricas dos volumes médios observados anualmente.	91
Tabela 7.1	- Cálculo da evapotranspiração potencial da culturas.	93
Tabela 7.2	- Cálculo da necessidade de irrigação líquida das culturas.	94
Tabela 7.3	- Cálculo da renda líquida das culturas em estudo.	95
Tabela 7.4	- Resultados do modelo linear determinístico I.	97
Tabela 7.5	- Resultados do modelo linear determinístico II.	98

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{s_k}	: área total disponível no semestre k ($k= 1,2$), em ha;
$CA_{i,j}$: custo da água para irrigar a cultura i no mês j , em R\$/ha;
CP_i	: custo de produção das culturas em R\$/ha;
CT_i	: custo total da cultura i em R\$/ha;
DEM_j	: demanda de água para irrigação durante o mês j , em m^3 ;
ETr_j	: evaporação do tanque classe A no mês j , em mm;
$ETm_{i,j}$: evapotranspiração potencial da cultura i no mês j , em mm;
ETo_j	: evapotranspiração de referência no mês j , em mm;
i	: número inteiro representando a cultura ($i=1,2,\dots,n$);
j	: número inteiro representando o mês de plantio ($j=1,2,\dots,12$);
k	: período de plantio da cultura ($k=1,2$ indicam 1º e 2º semestres);
Kc_i	: coeficiente de cultivo da cultura i ;
Kp	: coeficiente do tanque;
$Nirr_i$: eficiência do sistema de irrigação;
Nl_{ij}	: necessidade de irrigação líquida da cultura i no mês j , em mm;
Pe_j	: precipitação efetiva no mês j , em mm;
P_j	: precipitação média no mês j , em mm;
PMA	: preço médio da água (R\$0,13/mm.ha);
PMU_i	: preço unitário do produto da cultura i , em R\$/kg;
QA_j	: volume afluente ao reservatório durante o mês j , em m^3 ;
QD_j	: volume efluente do reservatório durante o mês j , em m^3 ;

- RB_i : renda bruta gerada com a cultura i em R\$/ha;
- RL : função objetivo que define a maximização do lucro líquido anual em R\$;
- RL_i : renda líquida gerada com a cultura i em R\$/ha;
- VEF_j : volume evaporado do reservatório durante o mês j , em m^3 ;
- $VINF_j$: volume infiltrado do reservatório durante o mês j , em m^3 ;
- VP_j : volume precipitado no reservatório durante o mês j , em m^3 ;
- VR_j : volume armazenado no reservatório no final do mês j , em m^3 ;
- X_{ik} : área cultivada com a cultura i no período de plantio k ;
- Y_i : produtividade obtida da cultura i , em kg/ha;
- $W_{T\ min\ j}$: quantidade mensal mínima de água disponível, em mm.ha;
- $W_{T\ max\ j}$: quantidade mensal máxima de água disponível, em mm.ha.

RESUMO

MARINHO, Manoel H. N. **Otimização do uso da água de um reservatório para fins de irrigação**. 2001. 119f. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Estudaram-se neste trabalho as condições de operação ótima do sistema composto pelo reservatório Engenheiro Arcoverde e perímetro irrigado da cidade de Condado-PB, situados no semi-árido paraibano, com o objetivo de desenvolver e aplicar modelos de otimização. Os modelos otimizam a operação do reservatório de regime plurianual através da equação do balanço hídrico do mesmo, usando demandas fixas e variáveis, sendo estas obtidas com base no balanço hídrico das culturas selecionadas, estabelecendo a necessidade suplementar líquida de irrigação para cada cultura. O processo de otimização determina a lâmina de rega a ser aplicada para cada tipo de cultura e o tamanho das áreas a serem irrigadas para um conjunto selecionado de culturas, no intuito de maximizar os benefícios financeiros líquidos auferidos pela irrigação de diversas culturas agrícolas, via a utilização de um método de programação linear determinístico. Os resultados proporcionarão aos usuários da água os maiores benefícios, sejam estes de caráter econômico ou social, gerando um maior número de empregos de baixos e altos salários. Obteve-se uma solução ótima para racionalizar o uso da água. Usou-se o software MATLAB® 5 (1999) como ferramenta computacional.

Palavras-chave: otimização, operação de reservatório, irrigação, programação linear.

1 INTRODUÇÃO

Essencial à vida, a água é um elemento necessário às diversas atividades humanas; além de constituir componente fundamental da paisagem e do meio ambiente. Recurso de valor inestimável, apresenta utilidades múltiplas, como geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, irrigação, navegação, recreação, turismo, aquicultura, piscicultura, pesca e, ainda, assimilação e condução de esgoto.

A quantidade de água existente na natureza é finita e, sua disponibilidade diminui gradativamente devido ao crescimento populacional, à expansão das fronteiras agrícolas e à degradação do meio ambiente. Sendo um recurso indispensável à vida, é de fundamental importância a discussão das relações entre o homem e a água, uma vez que a sobrevivência das gerações futuras depende diretamente das decisões que hoje estão sendo tomadas.

Toda comunidade tem aspiração pelo progresso e desenvolvimento do meio que convive. A história mostra que o progresso acelerado leva ao desequilíbrio das áreas envolvidas. Isto pode ser observado em regiões onde existe um desenvolvimento intenso da economia e grandes assentamentos urbanos. O resultado destas ações tem sido em geral um desperdício de recursos, deterioração das condições de vida, esgotamento das fontes e desequilíbrio da natureza.

O desequilíbrio da natureza é devido ao fato de serem evitadas as etapas intermediárias entre uma condição natural e uma condição desenvolvida da bacia. A resposta da natureza às ações do homem, começa a preocupar a comunidade em geral.

Hoje em dia, a comunidade em geral (tanto os intelectuais como os cidadãos comuns) reflete e preocupa-se cada vez mais com a degradação da natureza e o esgotamento de recursos naturais vitais para a sobrevivência do ser humano. Somente é possível atingir um desenvolvimento econômico e social contínuo e uma gestão racional do ambiente, fazendo uma redefinição de todos os objetivos e todas as modalidades de ação.

Os problemas de recursos, energia, ambiente, população e desenvolvimento serão corretamente observados quando houver uma análise das relações mútuas. Isto implica num quadro conceitual unificado do planejamento. Os planejadores consideram que o enfoque do aproveitamento e uso de um recurso para vários objetivos é obrigatório. Decisões tomadas no planejamento e no gerenciamento de recursos hídricos não podem ser consideradas independentes sobre outros setores como transporte, agricultura e indústria.

O planejamento da utilização dos recursos hídricos mostra-se como a atividade fundamental para a manutenção e uso das fontes naturais existentes. É a falta de equilíbrio entre a oferta e a demanda da água, que tem obrigado a procura por soluções mais adequadas. O principal problema é que a água não está disponível o tempo todo, em todos os locais e com a mesma qualidade. À medida que a demanda cresce começam a existir conflitos entre os usos. É assim, que surgem questões como:

- que sistemas devem ser construídos?
- qual a sua extensão?
- como estes devem ser operados, e ainda, quando e como os recursos econômicos estão disponíveis?

Estes problemas complexos devem ser resolvidos no processo de planejamento. Existem diferenças entre os problemas devido ao desenvolvimento e utilização de recursos. Os recursos são a soma do total dos bens, os quais podem ser usados para a manutenção e melhoria das condições de vida.

A análise dos problemas surgidos com o desenvolvimento do uso dos recursos hídricos deve ser discutida em relação aos objetivos que o desenvolvimento deseja atingir. É muito comum que os objetivos não sejam claramente definidos, mas encontram-se implícitos na formulação do problema ou na sua análise.

Os recursos hídricos são bens de relevante valor para a promoção do bem estar de uma sociedade. A importância do gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos aumenta na proporção em que estes recursos se apresentam de forma escassa, como no semi-árido nordestino, onde a baixa taxa de pluviometria, alta taxa de evaporação e as aberrações da distribuição espaço-temporal das chuvas decorrentes da sobrecarga que o ser humano está impondo ao ambiente, fazem com que a água se torne elemento fundamental no quadro sócio-econômico da região. Daí a necessidade de racionalização do uso da mesma.

A irrigação sistemática é uma prática rotineira em diversas regiões do país. É um suplemento para compensar a irregularidade pluviométrica, nas regiões Sul e Sudeste, e uma técnica obrigatória em razão dos baixos índices pluviométricos no Nordeste. O abastecimento das áreas irrigadas é feito a partir de grandes açudes públicos ou privados, que tem ainda a incumbência de suprir outros usos de água, também essenciais como o abastecimento doméstico, a produção de energia, para indústrias, etc. que são conflitantes com a irrigação. Sendo todos necessários e importantes, a racionalização do seu uso, no que tange a irrigação, faz-se fundamental. É um uso consuntivo, ou seja, a água retirada do manancial a ele não volta como efluente, como ocorre com os demais usos.

Segundo estudo realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais, CEMIG (LIMA et al., 1999), se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumida seriam economizadas. Tomando como base as estimativas feitas neste trabalho, o manejo adequado da irrigação traria um excedente ao país da ordem de 6.755.459.400 m³/ano de água e cerca de 2.336 GWh/ano de energia elétrica, o que reduziria as tensões sobre esses dois recursos de fundamental importância para o país.

Entre as diversas formas de uso da água, encontra-se o uso para a irrigação de terras agrícolas, um dos objetos de estudo deste trabalho, a qual vem se intensificando ao longo dos anos.

O modelo de otimização envolve a operação do reservatório Engenheiro Arcoverde e perímetro de irrigação, situados no município de Condado, Estado da Paraíba, e teve como objetivo, maximizar a receita líquida gerada por um perímetro irrigado, que é alimentado por um reservatório de regime plurianual, utilizando-se das técnicas da programação linear determinística.

Pretende-se com esta pesquisa fornecer subsídios que poderão ser utilizados para aumentar a eficiência do uso da água em regiões de alta escassez hídrica e auxiliar no processo de planejamento do uso integrado dos recursos hídricos da região, além de geração de empregos diretos e indiretos.

2 OBJETIVOS

Neste item, descrevem-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa em estudo.

2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar modelos de otimização através da programação matemática linear, compará-los e recomendar o mais adequado para determinar a alocação da água mensal destinada à irrigação e oriunda de um reservatório, com múltiplos usos, e para a determinação do tamanho das áreas a serem irrigadas para um conjunto selecionado de culturas visando o maior retorno econômico, e ainda, que proporcione aos usuários da água os maiores benefícios, sejam estes de caráter econômico ou social, gerando um maior número de empregos diretos e indiretos. Optou-se por este tipo de programação matemática, pela facilidade de aprendizado e capacidade de generalização, e grande aplicabilidade em modelos para um único reservatório.

2.2 Objetivos Específicos

Neste processo, enquanto procurou-se a solução que maximiza a receita líquida da escolha da área a ser irrigada, tratou-se também de garantir o abastecimento humano, o controle da estiagem, a sustentabilidade hídrica do reservatório e levando em consideração as restrições quer sejam de natureza física, econômica, cultural ou social imposta ao problema.

O objetivo principal foi a maximização do valor presente dos benefícios líquidos da operação, sujeita a restrições de balanço hídrico do reservatório e das culturas, alocação da área de plantação, produção das diferentes culturas e outros insumos.

A formulação utilizada considerou como hipótese que a área irrigada seja variável e a lâmina de água fixa, ao longo do tempo, possibilitando a utilização de maior área quanto maior for a disponibilidade de água e, no sentido oposto, a diminuição da área cultivada nos períodos secos.

O problema tratou-se da situação teórica em que o futuro é suposto conhecido, na qual os eventos hidrológicos são os que foram observados no passado.

A análise da solução do problema determinou formas para as regras de operação que serão implementadas no perímetro de irrigação, visando à racionalização do uso da água.

Foram, ainda, analisados os cenários mais secos e os de maiores cheias do reservatório. Fez-se uma análise do comportamento dos modelos para diferentes cenários hidroagrícolas, tentando verificar com isso qual o cenário que proporciona os melhores retornos econômicos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Tendo em vista estabelecer uma metodologia para definição de regras operacionais, necessárias para a operação de um sistema de reservatório e perímetro irrigado, fez-se um levantamento bibliográfico, o qual resume-se a seguir.

3.1 Introdução

Para AZEVEDO FILHO & NEVES (1988), os modelos de análise de sistemas representam uma simplificação da realidade de forma muito próxima da situação real. Na análise de sistemas, os modelos de programação linear são os mais utilizados pela facilidade de operacionalização e disponibilidade de "software", em escala comercial para sua resolução. No entanto, possuem restrições de aplicação, uma vez que, pressupõe uma relação linear entre as variáveis envolvidas, o que nem sempre ocorre na situação real. Na literatura sobre problemas agrícolas, os modelos de programação linear são bastante utilizados. Modelos de programação não-linear e programação dinâmica, com parâmetros determinísticos e probabilísticos, são de grande valia no planejamento de recursos hídricos de modo geral. Os modelos de programação dinâmica têm sido aplicados a problemas de dimensão reduzida, devido principalmente as dificuldades computacionais, inerentes ao modelo.

Um modelo de programação linear separável foi equacionado genericamente, por FRIZZONE (1996), de forma a indicar o uso racional do recurso hídrico num projeto de irrigação e no desenvolvimento de equações específicas e aplicadas a um caso real, envolvendo o Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho (PSNC), localizado em Petrolina-PE. O estudo de caso serviu a três propósitos: ilustrar o procedimento analítico, demonstrar a utilidade do modelo e fornecer informações à operação do PSNC. Este trabalho possibilitou a obtenção de planos ótimos de cultivo e a correspondente alocação de água, podendo ser facilmente adaptado a diferentes situações do meio físico.

Regras de operação para um sistema composto por cinco reservatórios para abastecimento de demandas urbanas e de irrigação na bacia do rio Acaraú, no estado do Ceará, foram desenvolvidos por OLIVEIRA & LANNA (1997), com o objetivo da maximização dos benefícios líquidos da operação, sujeita a restrições de balanço hídrico do reservatório e de umidade de solo na área cultivada com o uso da otimização linear na solução do problema. Duas formulações foram consideradas: 1) a área irrigada é fixa e a lâmina variável, e 2) a área irrigada é variável e a lâmina de rega é fixa, ao longo do tempo. Nas duas formulações ficou demonstrado que técnicas de otimização podem incrementar a eficiência econômica dos investimentos na infraestrutura hídrica regional e fornecer importantes informações para o dimensionamento e operação ótima de sistemas de recursos hídricos.

MARINHO et al. (1998) desenvolveram um modelo de programação linear, para determinar a alocação da água mensal destinada a irrigação e oriunda de um reservatório, com múltiplos usos, e para a determinação do tamanho das áreas a serem irrigadas para um conjunto selecionado de culturas visando o maior retorno econômico. Este modelo de programação matemática desenvolvido para maximizar a renda líquida de uma área de agricultura irrigada permitiu a obtenção de uma solução ótima para o problema. Observou-se a grande viabilidade das técnicas matemáticas de otimização, com destaque para a programação linear, na resolução de problemas de recursos hídricos que envolvem aspectos de agricultura irrigada.

O desenvolvimento de um modelo para a determinação de regras de operação, para um sistema de reservatórios com múltiplos usos da água, foi elaborado por (BERGMANN, 1993). A metodologia utilizada baseou-se no trabalho de KARAMOUZ & HOUCK (1982), a qual está constituída de três etapas, programação dinâmica, regressão e simulação, que funcionam dentro de um processo cíclico. A metodologia foi aplicada ao sistema Alto - Paraíba. Os usos da água considerados neste estudo foram a geração hidroenergética, as vazões mínimas a jusante do sistema, atendimento a irrigação e a vazão de bombeamento em Paraíba - Paraíbuna. O modelo desenvolvido permitiu a análise do desempenho de diferentes variáveis do sistema, sujeitas às regras determinadas no processo cíclico.

3.2 Planejamento de Recursos Hídricos

A seguir, tem-se uma breve abordagem sobre o Planejamento dos Recursos Hídricos e seus usos múltiplos.

3.2.1 Introdução

A análise moderna de sistemas de recursos hídricos começou, entre outros, com o trabalho de RIPPL (1883), tendo progredido com o desenvolvimento dos computadores. Este avanço tecnológico serviu também como fator catalisador na evolução de teorias matemáticas e métodos.

Todos estes processos e métodos de análise formam o conjunto chamado Pesquisa Operacional, que se desenvolveu a partir da Segunda Guerra Mundial. Foi assim que a publicação de DANTZIG (1955) (o método simplex para a programação linear) deu o marco definitivo na afirmação da Pesquisa Operacional.

Hoje em dia, no planejamento de recursos hídricos o atendimento de objetivos múltiplos é indispensável. Também não devem ser esquecidas as características espaciais e temporais dos sistemas e a natureza dinâmica. É comum surgir a questão: qual deve ser a alocação ótima de água, para atingir as metas desejadas? Estas questões são classificadas como problemas de programação. Estes problemas tentam maximizar ou minimizar uma função objetivo, respeitando determinadas restrições.

Os sistemas de recursos hídricos complexos têm como principais elementos os reservatórios. Eles são usados para redistribuição espacial e temporal de quantidade e qualidade da água e a potencialidade de geração energética. A principal característica de um reservatório é o fato de permitir os usos múltiplos da água. Entre esses usos múltiplos encontram-se:

- abastecimento de água para irrigação;
- abastecimento de água para uso residencial, industrial e público;
- controle da qualidade da água;
- controle de enchentes;
- geração hidroelétrica;
- navegação;
- recreação;
- piscicultura;
- manutenção da fauna e flora.

Não existe um tipo simples de análise, mas uma multiplicidade de problemas de decisão variando desde o volume útil ótimo até a seleção de regras operacionais. Dessa forma, surgem a simulação, a programação linear e a programação dinâmica como principais ferramentas para a solução destes problemas.

A modelagem de sistemas oferece um caminho, talvez o principal, para prever o comportamento futuro de sistemas existentes e propostos. O planejamento, gerenciamento e operação de recursos hídricos são muito complexos, não apenas pela

dificuldade de produzir algoritmos computacionais, mas também pela falta de compreensão de processos físicos interdependentes, bioquímicos, ecológicos, sociais, políticos e legais que controlam o comportamento do sistema.

3.2.2 Usos Múltiplos da Água

A utilização dos recursos hídricos para os múltiplos usos é uma decorrência direta do desenvolvimento econômico. Tradicionalmente, no Brasil, foi o uso dos recursos hídricos para geração de energia elétrica o que prevaleceu sobre todos os demais, uma vez que esses outros usos não se encontravam em um estágio de desenvolvimento que implicasse demandas elevadas por água. Entretanto, à medida em que o país se desenvolveu, tais usos passaram a se colocar em confronto com a utilização hidroenergética, fazendo florescer o que hoje constitui um importante princípio, o dos usos múltiplos, segundo o qual os recursos hídricos devem estar disponíveis, com igualdade de oportunidades, para todas as categorias de usuários interessados.

O princípio dos usos múltiplos estabelece, também, uma saudável competição entre os distintos tipos de usuários dos recursos hídricos. É justamente a utilização bem concatenada dos instrumentos de gestão, associada a um consistente manejo dos instrumentos de planejamento, que faz com que a disputa entre esses usuários competidores pela água não chegue ao nível dos conflitos de uso.

A igualdade de oportunidade entre os usuários competidores apregoada por este princípio não implica a repartição do uso dos recursos hídricos em quotas sempre iguais entre eles. Aliás, dificilmente em uma mesma bacia tais quotas serão iguais, uma vez que, sendo desiguais entre si, os usuários devem ser tratados desigualmente. Constituiria flagrante desigualdade, aliás, se os desiguais fossem tratados igualmente. O que o princípio indica é que, em todas as situações, o ponto de partida a ser

considerado é o da avaliação das demandas dos distintos usuários sendo feita em um plano de igualdade de observação, para que, em seguida, seja definida a verdadeira vocação sócio-econômica da bacia, a partir da qual as diferenças virão à tona. Há várias técnicas para essa definição. A análise de custos e benefícios sociais e privados, tanto quanto a análise de custo-efetividade, além da programação linear aplicada ou mesmo a teoria dos jogos ou ainda as chamadas árvores de decisão, podem ser de extrema valia para resolver o problema de alocação.

“É permitido a todos usar de quaisquer águas públicas conformando-se com os regulamentos administrativos”. A afirmativa está no CÓDIGO DE ÁGUAS (1934, Artigo 36), que reúne a legislação sobre a matéria do Direito das Águas públicas como um direito de todos. Baseando-se neste princípio, o gerenciamento dos recursos hídricos tem se utilizado da implantação de reservatórios como uma importante ferramenta para o atendimento dos usos múltiplos das águas e satisfação das necessidades humanas. No entanto, devido ao alto crescimento da demanda de energia elétrica e da água destinada ao abastecimento público, industrial e agrícola, o uso múltiplo das águas provocou o surgimento de conflitos que envolvem aspectos ambientais e operacionais, independentemente da finalidade principal do reservatório.

Entre os usos conflitantes dos reservatórios, estão o abastecimento de água, a irrigação, a recreação, a regularização de vazão mínima para o controle de poluição, a navegação e a geração de energia elétrica, que são usos conservativos e complementares entre si, onde os benefícios se maximizam com o armazenamento de volumes d'água, que garantam vazões e/ou níveis exigidos pelo uso, e o controle de cheias, que beneficia-se com a criação de volumes vazios, objetivando laminar o volume de água afluente.

Estes conflitos seriam de menor importância, se o uso do recurso hídrico fosse mínimo, mas quando ele aproxima-se do máximo, como no caso da geração de energia hidrelétrica, os conflitos de uso podem adquirir grandes proporções (NEMEC, 1986).

Com a aproximação do século XXI, emerge a preocupação mundial no que se refere ao déficit de água que afligirá a terra no início do novo milênio. Diante do alerta, o aproveitamento dos recursos hídricos assume uma nova abordagem onde não mais prevalecerão as construções de grandes obras hidráulicas, hoje sujeitas a restrições ambientais. A promulgação da lei 9443, de 8 de janeiro de 1997, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos no intuito de melhor utilizar este bem público. Para atender às demandas de água crescentes faz-se necessário otimizar a operação dos aproveitamentos em busca de melhorar a eficiência dos diversos usos, bem como intensificar o uso de fontes alternativas de energia economicamente viáveis.

3.3 Gerenciamento dos Recursos Hídricos

Neste item faz-se uma breve revisão literária dando uma visão geral sobre Gerenciamento de Recursos Hídricos no que diz respeito a conceitos e análise de Sistemas e Engenharia de Recursos Hídricos, que direta ou indiretamente está envolvido com o tema em estudo.

Pode-se definir Gerenciamento dos Recursos Hídricos como um conjunto de medidas legais (leis, medidas provisórias, normas e regulamentos) aprovadas pelo poder governante destinadas a administrar o armazenamento, uso, aproveitamento e preservação da água, tendo-se como referencial o princípio de que a água deve ser gerenciada de forma descentralizada. As decisões devem ser tomadas a nível territorial e de planejamento das próprias bacias hidrográficas, integrada, ou seja, levando em consideração todas as fases do ciclo hidrológico e observando seus aspectos quantitativos e qualitativos.

Todo processo de gerenciamento, à nível da bacia hidrográfica, conta com a participação de representantes dos usuários, das instituições governamentais e não

governamentais e da sociedade civil organizada, sendo a bacia hidrográfica a unidade de planejamento e atuação. Como resultado dessas ações ficará fixado o que é denominado de gestão dos recursos hídricos, entendido como o campo administrativo adotado na organização do Estado para gerir os recursos hídricos (CUNHA, 1999).

Para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos, de forma participativa, integrada e descentralizada, faz-se necessário a utilização de várias atividades tais como: **planejamento, operação, monitoramento, manutenção e apoio à organização dos usuários**. Segue aqui um breve comentário destas atividades:

Planejamento: Segundo BARTH (1987) planejamento, no conceito da ciência econômica, onde é bastante empregado, é a forma de conciliar recursos escassos e necessidades abundantes. Em recursos hídricos, o planejamento pode ser definido como um conjunto de procedimentos organizados que visam ao atendimento das demandas de água, considerada a disponibilidade restrita desses recursos. O planejamento dos recursos hídricos visa a avaliação prospectiva das demandas e das disponibilidades desses recursos e a sua alocação entre usos múltiplos, de forma a obter os máximos benefícios econômicos e sociais. É necessário planejar a longo prazo em razão do tempo de maturação de obras hidráulicas, da vida útil dessas obras e pela repercussão das decisões tomadas, que alcançam várias gerações, sendo, muitas vezes irreversíveis.

Apesar da necessidade de se planejar a longo prazo, os planos de recursos hídricos devem conter programas e projetos de curto e médio prazos compatíveis com os horizontes dos planos de desenvolvimento e dos orçamentos públicos. Dentre os objetivos de um plano, podem ser selecionados, por exemplo, os seguintes: maximização dos benefícios nacionais e regionais, minimização dos impactos ambientais e melhoria da qualidade de vida. Maior ou menor prioridade a um desses objetivos influirá no seu resultado. Por exemplo, se a prioridade absoluta for dada à maximização do desenvolvimento econômico nacional, poderá haver maior ênfase para a construção de aproveitamentos hidrelétricos e para industrialização, em detrimento

dos impactos ambientais e da qualidade dos recursos hídricos. A alocação de tais recursos entre usos múltiplos é problema bastante complexo, cuja solução deve ser procurada com técnicas de análise de sistemas. Mas, para que essas técnicas possam ser aplicadas em casos reais, é necessário que o planejador esteja acessorado por leis regulamentadas que sirvam de base no processo da tomada de decisão.

Operação: objetiva principalmente no caso dos reservatórios, definir a liberação de água de forma a atender a demanda (os usos), levando em consideração a oferta disponível e as características do próprio reservatório.

Monitoramento: tem a função de realizar o acompanhamento dos aspectos qualitativos e quantitativos da água, no que diz respeito aos níveis dos reservatórios, vazões liberadas, consumo dos usuários, vazões nos rios perenizados e os níveis de contaminação química e biológica, servindo de informação para auxiliar a tomada de decisão da operação.

Manutenção: é importante na realização de estudos da situação física das estruturas hidráulicas, como paredes dos açudes, comportas, canais, etc., verificando a necessidade de recuperação e definindo planos de conservação para as referidas estruturas.

Apoio a Organização dos Usuários: conscientizar, educar os usuários para que de forma organizada possam gerenciar, com o devido apoio técnico, o insumo água.

Estas diversas atividades, acima citadas, são componentes importantes de um sistema gerencial que seja capaz de fornecer informações para a tomada de decisão com o objetivo final de promover de forma coordenada o uso, controle e preservação da água. A política de Gestão dos Recursos Hídricos onde quer que seja implantada, só trará resultados benéficos à comunidade local se orientada por leis que determinem através de seus artigos as prioridades e limitações com relação ao uso da água. No Brasil, os instrumentos jurídicos que formam uma base para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos são as leis Federais e Estaduais.

3.3.1 Análise de Sistemas e Engenharia de Recursos Hídricos

Segundo LANNA (1997) a análise de Sistemas de Recursos Hídricos é uma técnica de solução de problemas complexos de Engenharia de Recursos Hídricos a partir da abordagem sistêmica e do uso de técnicas de simulação e otimização (técnicas computacionais agregadas à modelagem matemática de sistemas de recursos hídricos). Nesta definição estão inseridos termos técnicos como: Engenharia de Recursos Hídricos, abordagem sistêmica e técnicas de análise de sistema (simulação e otimização) que merecem um devido comentário.

A Engenharia de Recursos Hídricos envolve decisões relacionadas à infraestrutura hídrica. De forma sumária, ela visa promover a alteração dos padrões qualitativos e quantitativos das disponibilidades de água de forma a adequá-los aos padrões qualitativos e quantitativos das demandas hídricas. Quando o padrão espacial de disponibilidade de água não está adequado ao padrão espacial das demandas dos centros de consumo pode torna-se necessário a busca de água em outros locais, seja na superfície ou no subsolo, de forma oposta, quando o problema é excesso (cheias) a solução pode ser obtida com a construção de canais, bueiros ou outras estruturas que desviem parte das águas para locais onde possam ser acomodadas adequadamente. Em todas as situações o padrão espacial de disponibilidade de água é alterado para adequá-lo ao padrão espacial das demandas.

O padrão qualitativo das águas, tanto quanto o quantitativo, deve ser objeto de consideração e de adequação das disponibilidades com as demandas. Afinal, não basta a água estar disponível na quantidade certa, a qualidade também importa. Por exemplo: de que adianta ter um reservatório com capacidade d'água que possa suprir a demanda de um município, se não existe uma estação de tratamento para a água armazenada, afim de adequá-la ao consumo. O padrão qualitativo de disponibilidade de água é intrinsecamente vinculado ao padrão quantitativo. A complexidade das decisões que fazem parte da Engenharia de Recursos Hídricos decorre tanto das diferentes

possibilidades de suprimento às demandas quanto das variabilidades destas demandas. As principais classes de demandas de água são:

1-Infra-estrutura social: refere-se às demandas gerais da sociedade nas quais a água é um bem de consumo final;

2-Agricultura e aquicultura: refere-se às demandas de água como bem de consumo intermediário visando a criação de condições ambientais adequadas para o desenvolvimento de espécies animais ou vegetais de interesse para a sociedade;

3-Industrial: demandas para atividades de processamento industrial e energético nas quais a água entra como bem de consumo intermediário.

Quanto a natureza de utilização existem três possibilidades:

1-Consuntivo: refere-se aos usos que retiram a água de sua fonte natural diminuindo suas disponibilidades quantitativas, espacial e temporal;

2-Não-consuntivo: refere-se aos usos que retornam à fonte de suprimento, praticamente a totalidade da água utilizada, podendo haver alguma modificação no seu padrão temporal de disponibilidade quantitativa;

3-Local: refere-se aos usos que aproveitam a disponibilidade de água em sua fonte sem qualquer modificação relevante, temporal ou espacial e de disponibilidade quantitativa.

3.3.1.1 Conflitos de Uso da Água

Com a aceleração do desenvolvimento econômico, ampliou-se os objetivos sócio-econômicos e conseqüentemente a diversificação dos usos da água, com um acentuado e crescente aumento do consumo. Entretanto nem sempre pode-se aumentar a oferta na mesma proporção, pois existem limites naturais, como a quantidade de água precipitada numa determinada região, a falta de mananciais que

servam de suporte para o abastecimento de uma região, etc. Desta forma agravam-se os conflitos, pois justamente por ser a água um elemento que serve a múltiplos usos é comum ocorrer a competição entre usuários, tornando-se fundamental, portanto, estabelecer mecanismos que permitam o uso desse bem de forma ordenada, realizando um gerenciamento integrado dos recursos hídricos, considerando todos os usos e atividades que possam resultar em conflitos ou degradação para o meio ambiente.

Segundo LANNA (1997) os conflitos de uso das águas podem ser classificados como:

a) conflitos de destinação de uso: esta situação ocorre quando a água é utilizada para outras destinações que não aquelas estabelecidas por decisões políticas, fundamentadas ou não em anseios sociais, que as reservariam para o atendimento de demandas sociais, ambientais e econômicas. Por exemplo, a retirada de água de reserva ecológica para a irrigação;

b) conflitos de disponibilidade qualitativa: situação típica de uso de água em rios poluídos. Existe um aspecto vicioso nestes conflitos, pois o consumo excessivo reduz a vazão de estiagem deteriorando a qualidade das águas já comprometidas a priori pelo lançamento de poluentes. Esta deterioração por sua vez, torna a água ainda mais inadequada para consumo;

c) conflitos de disponibilidade quantitativa: situação decorrente do esgotamento da disponibilidade quantitativa devido ao uso intensivo. Exemplo: uso intensivo de água para irrigação impedindo outro usuário de captá-la, ocasionando em alguns casos esgotamento das reservas hídricas. Este conflito pode ocorrer também entre dois usos não-consuntivos. Exemplo: operação de hidrelétrica estabelecendo flutuações nos níveis de água acarretando prejuízos à navegação. Em conjunto com esses conflitos ocorrem incrementos das demandas hídricas devido ao aumento populacional, agravando o problema de abastecimento, particularmente nas regiões semi-áridas. Outro problema é o controle de inundações que se tornou imperativo nas regiões que sofreram o efeito simultâneo da urbanização não planejada, que impermeabilizou o solo e invadiu o leito maior dos rios, e do manejo do solo não adequado, que assoreou os

cursos de água. O estágio de apropriação dos recursos hídricos no Brasil atingiu um nível em que conflitos de uso são fartamente detectados nas regiões mais desenvolvidas ou mais carentes de água. Além daqueles relacionados com a qualidade de água, notados nas bacias urbanizadas e industrializadas, existem também conflitos quantitativos. Suas soluções exigem análises técnicas e institucionais de grande complexidade. Conclui-se, portanto, que o uso múltiplo dos recursos hídricos poderá ser uma opção inicial, mas também será uma consequência natural do desenvolvimento econômico.

3.3.1.2 Técnicas de Análise de Sistemas

São técnicas computacionais agregadas a modelagem matemática de sistemas.

Os principais elementos são:

Sistema: conjunto de elementos inter-relacionados que interagem entre si, ou seja, é qualquer estrutura, esquema ou procedimento que num dado tempo de referência inter-relaciona-se com uma entrada, causa e uma saída, produzindo efeito. Por exemplo, uma bacia hidrográfica é um sistema que acionado por uma entrada, a precipitação, através dos diversos fenômenos do ciclo hidrológico, transforma esta precipitação em vazão, saída;

Modelo: é uma representação do comportamento do sistema;

Fenômeno: é um processo físico que produz alteração de estado no sistema. Por exemplo: precipitação, evaporação, infiltração etc;

Variável: é um elemento que descreve quantitativamente um fenômeno variando no espaço e no tempo. Por exemplo: vazão e evaporação, e;

Parâmetro: é um valor característico o sistema. Por exemplo. A área da bacia, o raio hidráulico de uma seção transversal.

3.3.1.3 Técnicas de Simulação

Basicamente as técnicas para análise de Sistemas de Recursos Hídricos podem ser agrupadas em: técnicas de simulação e técnicas de otimização (LOUCKS et al., 1981). Os modelos de simulação procuram oferecer uma representação do mundo real através da realidade computacional com o objetivo de permitir a geração e a análise de alternativas, antes da implementação de qualquer uma delas. Por isso, dão ao planejador um grau de liberdade e flexibilidade considerável, com relação ao processo da tomada de decisão. HALL & DRACUP (1970) e LOUCKS et al. (1981), definem simulação como um conjunto de expressões matemáticas estruturadas em uma seqüência lógica que descreve a operação do sistema no espaço e no tempo. Assim, a simulação procura representar um sistema em seus aspectos importantes. Um modelo de simulação não determina, por exemplo, a política ótima de um sistema de reservatórios. A partir da definição da política de operação a ser seguida, o modelo de simulação permite o acompanhamento dos níveis dos reservatórios, e de outras variáveis pertinentes ao longo do tempo.

Os modelos de simulação são classificados em: HALL & DRACUP (1970) e HERMANN, (1970) modelos físicos, modelos analógicos e modelos digitais ou matemáticos.

Físicos: representa o sistema por um protótipo em menor escala;

Analógicos: valem-se da analogia das equações que regem diferentes fenômenos para modelar, no sistema mais conveniente, o fenômeno mais complexo;

Matemáticos ou digitais: representam a natureza do sistema através de equações matemáticas.

Os modelos físicos e analógicos tem vantagens quando as leis físicas não podem ser expressas de forma sucinta e com equações facilmente resolvíveis, enquanto que os modelos matemáticos são mais versáteis, pois pode-se modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de

diferentes sistemas, outras vantagens são a alta velocidade de processamento pelo computador, baixo custo e maior flexibilidade para os modeladores que gostam de fazer mudanças. É penalizado pela dificuldade de representação matemática dos fenômenos físicos e discretização de processos contínuos.

3.3.1.4 Técnicas de Otimização

Quando na análise do sistema existe o interesse em otimizar o processo decisório de acordo com uma valoração estabelecida pela função objetivo devem ser aplicadas técnicas de otimização. Para se definir entre um modelo de otimização ou um modelo de simulação, deve-se considerar a complexidade do sistema estudado, ou seja, as características do sistema considerado, dos dados avaliados e dos objetivos e restrições especificadas, os quais possibilitarão a opção por modelos de otimização ou modelos de simulação ou ainda uma combinação entre os mesmos. Casos onde o conhecimento dos fenômenos a serem tratados é suficiente para escrever equações que descrevem e governam o sistema, podem ser tratados por um modelo de otimização ou por modelos de simulação matemáticos. Para sistemas complexos que não podem ser analisados diretamente através das metodologias analíticas formais, usa-se a simulação física ou analógica.

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, em que, 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:

$$\text{Max (Min) } F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.1)$$

sujeito a:

$$\left\{ \begin{array}{l} g_1 (X_1, X_2, \dots, X_n) \leq b_1 \\ g_2 (X_1, X_2, \dots, X_n) \leq b_2 \\ g_m (X_1, X_2, \dots, X_n) \leq b_m \end{array} \right. \quad (3.2)$$

em que, 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 (3.2) é chamado de solução viável. Dentre as soluções viáveis, aquela que também satisfaz a (3.1) é chamada de solução ótima.

3.3.1.5 Programação Linear

Todo problema de programação linear caracteriza-se pelo estabelecimento de relações lineares, ou seja, todas as equações envolvidas são necessariamente representadas por relações lineares entre as variáveis. Um problema de programação linear pode ser abordado da seguinte forma: considere n variáveis não-negativas X_j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) e uma função linear Z destas variáveis que deve ser maximizada, segundo a forma :

$$\text{MAX } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (3.3)$$

sujeito a:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2 \\ a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_m \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$X_1 \geq 0 ; X_2 \geq 0 ; \dots ; X_n \geq 0 \quad (3.5)$$

A questão da otimização da irrigação com déficit foi tratada por MANNOCHI & MECARELLI (1994), utilizando um modelo de programação linear. As restrições entre produção das culturas e água aplicada, assim como os componentes estocásticos dos processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera foram introduzidos como restrições do modelo de programação linear para otimização da irrigação, constituindo a possibilidade de variação do plano de cultivo.

DANTAS NETO (1994) conduziu um estudo otimizando padrões irrigados através do uso de programação linear padrão e linear separável. Para isto utilizou lâminas de irrigação fixa e alternadas, respectivamente. Concluiu-se que as lâminas de água alternadas com o modelo de programação linear separável, resultou em um maior retorno financeiro para os padrões de cultivos alocados.

Para BALTRA (1982), os modelos de programação linear nos projetos de irrigação podem ser utilizados nos seguintes tipos de planejamento agrônômico:

I) otimização de planos de culturas, para otimização dos recursos, podendo-se utilizar como função objetivo:

- a) maximização do lucro;
- b) minimização do uso da mão-de-obra;
- c) otimização do uso da água;
- d) otimização do uso das máquinas agrícolas.

O modelo usa as restrições:

- a) volume de água disponível;
- b) demanda de água pelas culturas;
- c) custo de produção;
- d) disponibilidade de terra;
- e) receita líquida;
- f) custos de mercado; e,

II) determinação de lâminas e intervalos de irrigação;

- III) previsões meteorológicas;
- IV) transporte de grãos;
- V) potencial de bacias de captação e balanços hídricos.

De acordo com ALBUQUERQUE FILHO (1986), o uso da programação linear exige um conhecimento de todos os fatores que possam influenciar no funcionamento do sistema a ser otimizado. No caso de projetos de irrigação, os seguintes fatores estão entre os que mais comumente afetam a operação e os custos dos sistemas, influenciando diretamente nos seus benefícios:

- a) disponibilidade de recursos naturais (solo/água) adequados;
- b) disponibilidade de capital;
- c) políticas operacionais adequadas (quando e quanto irrigar);
- d) uso de insumos, fertilizantes e defensivos agrícola;
- e) disponibilidade de mão de obra;
- f) disponibilidade de equipamentos apropriados;
- g) comercialização da produção (armazenamento, preços, etc.);
- h) energia e custo compatível;
- i) restrições legais (concessões), e outros.

3.3.1.6 Programação Dinâmica

O modelo matemático de programação dinâmica é utilizado quando se tem uma seqüência de decisões que envolvem várias etapas e quer determinar-se qual a melhor combinação de decisões feitas com a finalidade de obter a seqüência ótima de decisões. Esta seqüência de decisões submete a divisão do problema em uma série de estágios com uma política de decisão para cada estágio. Para cada estágio pode haver qualquer número de estados lhe associados.

Para atender uma certa demanda de geração de energia elétrica e o uso da água para fins de irrigação, SOARES FILHO & ANDRADE FILHO (1988), desenvolveram um modelo usando a técnica de programação dinâmica estocástica. Este procedimento foi aplicado ao sistema hidroelétrico do rio São Francisco (Sistema CHESF).

Dado o estado presente, a política para os estágios remanescentes não depende da política adotada nos estágios anteriores. Em contraste com a programação linear, não existe uma formulação matemática padrão para o problema de programação dinâmica. Ao contrário, a programação dinâmica é um tipo geral de abordagem para a solução de problemas e as equações particulares usadas têm que ser desenvolvidas para se ajustarem a cada situação em particular. Por isso, é necessário um certo grau de engenhosidade e discernimento, diante da estrutura geral dos problemas de programação dinâmica para se reconhecer quando um problema pode ser resolvido pelos procedimentos de programação dinâmica e como isso seria feito. Provavelmente, essas habilidades podem ser melhor desenvolvidas através da exposição a uma ampla variedade de aplicações da programação dinâmica e do estudo das características que são comuns a todas estas situações.

A programação dinâmica, formulada por BELLMAN (1957), é um procedimento de otimização para um processo de decisão com múltiplas etapas.

3.3.1.7 Programação Não-Linear

A programação não-linear, na sua formulação, é semelhante a formulação geral da programação linear, consiste em uma função objetivo e um conjunto de restrições. A programação não-linear, caracteriza-se por não ter os requisitos de linearidade que a programação linear exige. O modelo matemático geral pode ser representado da seguinte forma:

$$\text{MAXIMIZAR OU MINIMIZAR } Z = f(X) \quad (3.6)$$

sujeito as restrições:

$$g_i(X) < 0; \quad i = 1, 2, \dots, m_1 \quad (3.7)$$

$$h_k(X) = 0; \quad k = 1, 2, \dots, m_2 \quad (3.8)$$

$$X^L \leq X \leq X^U \quad (3.9)$$

em que:

Z: função objetivo que define a grandeza a ser otimizada;

$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T$ é um vetor contendo n variáveis denominadas variáveis de decisão, cujos valores ótimos se busca determinar;

$g_i(X) < 0$ (ou > 0) e $h_k(X) = 0$ são restrições de desigualdade e de igualdade;

X^L e X^U representam os valores mínimos e máximos que podem ser assumidos pelas variáveis de decisão.

PEREIRA MENDES (1996) conduziu um trabalho para avaliar e comparar três modelos matemáticos de otimização: programação linear padrão, linear separável e não-linear. A função objetivo dos modelos foi otimizar a alocação de áreas irrigáveis com diferentes culturas tendo como restrições os recursos terra, água e mercado, visando a maximização dos retornos financeiros. O modelo de programação não-linear proporcionou maiores retornos financeiros.

CUNHA (1999), desenvolveu em sua pesquisa um modelo de programação linear desenvolvido por CURI & CURI (1998), que tem a capacidade de lidar com as não-linearidades intrínsecas do problema através de um processo recursivo. E concluíram que, é possível aumentar a receita líquida do perímetro irrigado para uma escolha mais adequada de áreas de culturas a serem irrigadas e o manejo da água oriunda do reservatório e poços amazonas.

Os problemas práticos de otimização freqüentemente envolvem comportamento não-linear que deve ser levado em consideração. Às vezes é possível reformular estas relações não-lineares para ajustar o problema a um formato de programação linear. Em contraste com o método simplex para programação linear, não existe nenhum algoritmo eficiente que possa ser usado para resolver todos os problemas de programação não linear. Na verdade, alguns destes problemas não podem ser resolvidos por nenhum método, de maneira muito satisfatória. Entretanto, tem havido um progresso considerável para algumas classes importantes de problemas. Para estes casos, existe disponível uma variedade de algoritmos que são usados com alguma freqüência e que têm demonstrado um desempenho razoavelmente bom.

Durante muitos anos, pesquisas tentando relacionar produção de culturas e uso de água, têm sido guiadas, de maneira implícita, por várias noções do que constitui o desejável nível do uso da água. Conforme VAUX JR. & PRUITT (1983), três orientações gerais podem ser identificadas:

- a) os trabalhos de técnicos voltados para a produção são freqüentemente dirigidos com o objetivo de estabelecer o nível de água necessário para se obter a máxima produção por hectare: neste objetivo particular fica implícito que a água não deve ser fator limitante;
- b) outra corrente de pensamento encontrada na literatura de irrigação é a de máxima eficiência do uso da água, a qual ocorre quando a produção da cultura por unidade de água é maximizada; e,
- c) a água para ser usada eficientemente deverá ser aplicada até o ponto onde o preço da última unidade de água utilizada é igual ao valor de venda obtido com resultado desta aplicação.

Porém, quando a água é fator limitante, o volume economizado pela irrigação com déficit, pode ser utilizado para irrigar uma quantidade adicional de terra, aumentando a renda da empresa.

3.4 Situação Atual da Irrigação no Brasil

O apoio à irrigação por meio de políticas, na esfera federal, tem se caracterizado por ênfases diversas, com quebra de continuidade em função da influência conjuntural de seus determinantes, inclusive os de natureza regional. Por essa razão, as medidas postas em prática assumiram, durante muito tempo, características espaciais diferenciadas. Mesmo com essa perspectiva, as iniciativas não corresponderam às exigências continuadas de desenvolvimento da irrigação em todo o país. Os aspectos particulares da questão, desempenho das políticas públicas, avanços obtidos, comportamento da irrigação segundo indicadores e parâmetros selecionados e lições da experiência, assim se apresentam.

O Brasil por ser um país muito extenso apresenta uma grande diversidade de climas e sistemas agrícolas. Também existem diferentes métodos e sistemas de irrigação e de irrigantes de diversos portes nos cerca de 2,87 milhões de hectares irrigados (1998).

Para propósito de desenvolvimento regional, o governo dividiu o país em cinco regiões CHRISTOFIDIS (1999):

a) O Sul é subtropical, com invernos amenos e secos e verões mornos e úmidos. Devido ao congelamento, há poucas oportunidades para a irrigação de inverno fora da temporada; e embora a irrigação suplementar de verão possa poupar os agricultores de fracassos nas colheitas nos anos secos, ela acrescenta muito pouco aos rendimentos de sequeiro das culturas básicas de verão no Sul – milho, feijão e soja. Como resultado, o desenvolvimento da irrigação no Sul voltou-se principalmente para a inundação de verão das terras baixas com a produção de arroz. A maior parte é de grande escala e mecanizada, e está estreitamente integrada à pecuária; as terras baixas são mantidas com pastagens não irrigáveis durante os outros dois. Na década de 80, o Governo promoveu a irrigação do arroz em terras baixas em pequena escala

dentro do seu programa PROVÁRZEAS para o desenvolvimento de várzeas inundáveis;

b) A região Sudeste, estendendo-se aproximadamente de 14° Sul até o Trópico de Capricórnio, também recebe a maior parte da sua precipitação anual no verão. Os seus invernos são mais amenos do que no Sul; conseqüentemente, a irrigação de inverno permite duas safras anuais, e os agricultores fazem a rotação do trigo de inverno, da ervilha ou do feijão com culturas de verão de sequeiro, incluindo o algodão. Os agricultores também estão a cultivar feijão e outras culturas com irrigação suplementar no inverno, em rotação com a cultura principal do arroz inundado de verão;

c) O Centro-Oeste estende-se das margens da bacia Amazônica no oeste até o Estado de Goiás no leste, e de aproximadamente 8° a 24° Sul. No seu extremo oeste, tem uma precipitação anual relativamente bem distribuída de até 2.500 mm/ano e há pouca necessidade de irrigação. Mais a leste, a precipitação decresce para cerca de 1.000 mm e a irrigação se faz necessária durante os seis meses de seca. A maior parte do Centro-Oeste é de Cerrado, o qual é potencialmente produtivo se a acidez natural e o baixo teor de fosfato forem corrigidos. As grandes propriedades e o nível dos solos-terra adaptam-se bem aos sistemas de irrigação e evoluíram rapidamente nos últimos anos.

Livre das dificuldades impostas pela temperatura de inverno, a irrigação no Cerrado poderá aumentar sensivelmente a intensidade ocupada. Todavia, a região é prejudicada por sua distância das principais áreas de consumo e portos;

d) O Nordeste inclui as terras semi-áridas do Brasil, com precipitação anual distribuída irregularmente variando de 750 mm a menos de 250 mm. A região contém os agricultores mais pobres do país e um grande número de sem-terras. Muitos lavradores cultivam somente para sua subsistência. Ao contrário de outras regiões, os recursos hídricos na maior parte do Nordeste são extremamente limitados. O rio São Francisco domina a região, mas a topografia e a natureza do solo geralmente requerem

que sua água seja extraída por bombeamento e conduzida através de distâncias consideráveis até a terra irrigável. Vários rios sazonais foram regularizados pelo Governo. Há algumas áreas baixas próprias para o arroz inundado, principalmente na faixa costeira mais úmida e nas zonas de transição do Amazonas nos Estados do Maranhão e Piauí. Nos locais em que as dificuldades com a água podem ser superadas, o clima quente do Nordeste favorece a produção de milho, feijão, algodão e cana-de-açúcar, bem como o cultivo de hortigranjeiros o ano todo e a produção de sementes.

O interior árido da região Nordeste continuou não desenvolvido até os meados de 1990, com somente alguns focos de desenvolvimento de irrigação do setor privado nos vales ao longo dos cursos de água. As estruturas de maior porte e de custo mais elevado de condução da água, necessárias para irrigar a terra a uma longa distância da fonte, bem como a incerteza e o tamanho limitado dos mercados regionais para as culturas de valor elevado, essenciais para justificar investimentos em irrigação e outras infra-estruturas de apoio, bloquearam a maior parte do desenvolvimento da irrigação de grande escala do setor privado. O Governo construiu projetos públicos de irrigação do setor público na região, com os objetivos múltiplos de superar o persistente déficit regional de alimentos na área e produzir frutas e vegetais para os mercados em expansão, além de criar empregos e beneficiar os pobres da zona rural, e;

e) A região Norte compreende a maior parte dos trópicos úmidos do Brasil. As necessidades de irrigação são pequenas, e o desenvolvimento da irrigação limita-se a pequenas áreas de produção de arroz e destaca-se a necessidade da drenagem agrícola.

3.4.1 Irrigação: histórico e vantagens

O crescimento demográfico, implicando em maiores demandas de alimento, é um delicado problema que preocupa a todos os países, constituindo-se em um sério desafio científico-tecnológico. Ao setor agropecuário cabe a tarefa de fornecer alimentos à humanidade, em níveis crescentes de quantidade e qualidade. A irrigação, sobretudo nas regiões áridas e semi-áridas, que abrangem cerca de 55% da área continental da Terra, se constitui em uma das mais importantes tecnologias para o aumento da produtividade agrícola.

A irrigação é uma técnica agrícola que consiste na aplicação artificial de água às plantas, através de métodos que melhor se adaptem ao solo e seu declive e à cultura a explorar, visando proporcionar umidade adequada ao desenvolvimento normal das plantas, suprimindo a falta, a insuficiência ou a má distribuição das chuvas, com o propósito de incrementar a produção sem o inconveniente de provocar a erosão ou o acúmulo de sais no solo.

A história da irrigação se confunde, na maioria das vezes, com a história da agricultura e da prosperidade econômica de inúmeros povos. Muitas das antigas civilizações se originaram em regiões áridas, onde a produção só era possível com o concurso da irrigação.

Estudos comprovam que 4.500 a.C. essa prática era utilizada pelos Assírios, Caldeus e Babilônicos, no continente asiático. Da mesma forma, as grandes aglomerações que se fixaram nas margens dos rios Huang Ho e Lang-Tse-Kiang, na China (ano 2.000 a.C.), do Nilo, no Egito, do Tigre e do Eufrates, na Mesopotâmia e do Ganges, na Índia (ano 1.000 a.C.), nasceram e cresceram graças à utilização eficiente de seus recursos hidráulicos. Só mais tarde, há cerca de 1.500 anos, é que a humanidade se deslocou para regiões úmidas, onde a irrigação perdeu sua necessidade vital, transformando-se unicamente em prática subsidiária e pouco usada.

Aí cresceram as grandes concentrações humanas, que foram forçadas, para sua subsistência, a explorar quase todo o solo arável. Com o contínuo crescimento demográfico, a humanidade se viu compelida a praticar a irrigação, tanto para suplementar as chuvas nas regiões úmidas, como para tornar produtivas as zonas áridas e semi-áridas.

O Brasil, dotado de grandes áreas agricultáveis localizadas em regiões úmidas, não baseou, no passado, a sua agricultura na irrigação, embora haja registro de que, em 1589, os Jesuítas já praticavam a irrigação na antiga Fazenda Santa Cruz, no estado do Rio de Janeiro.

A difusão da irrigação se processou em maior escala nas culturas de arroz no Rio Grande do Sul e em alguns vales da região central do país. Também na região mais seca do Nordeste e nos estados de Minas Gerais e São Paulo, era praticada em culturas de cana-de-açúcar, batatinha, pomares e hortas. Em cafezais, iniciou-se na década de 50, com o emprego da aspersão, aos quais se mostrou particularmente adaptada, especialmente nas terras roxas do estado de São Paulo.

A irrigação, de caráter suplementar às chuvas, tem sido aplicada no Centro-Oeste do País, especialmente em culturas perenes. Embora a região apresente boas médias anuais de precipitação pluviométrica, sua distribuição anual (concentrada no verão, sujeito a veranicos e escassa ou completamente ausente no inverno) permite, apenas, a prática de culturas anuais (arroz, milho, soja, etc), as quais se desenvolvem no período chuvoso e encontram no solo um suprimento adequado de água. Já as culturas perenes (café, citrus, cana-de-açúcar, pastagem, etc), atravessam, no período seco, fases de sensível deficiência de água, pela limitada capacidade de armazenamento de água do solo, interrompendo o desenvolvimento vegetativo e acarretando colheitas menores ou nulas. A vantagem e a justificativa econômica da irrigação suplementar está na garantia de boa safra, a despeito da incerteza das chuvas.

Com relação à geração de empregos diretos, a agricultura irrigada nordestina é mais intensiva do que nas outras regiões do país. Na região semi-árida, a irrigação tem destacado papel a cumprir, como aliás já ocorre em importantes pólos agroindustriais do Nordeste. Particularmente no vale do São Francisco, os projetos públicos de irrigação, além de eliminar a vulnerabilidade da agricultura às irregularidades climáticas e aumentar a produtividade da terra, com conseqüente crescimento da produção e da renda, vêm contribuindo expressivamente para o sucesso da agricultura irrigada.

O desenvolvimento da agricultura irrigada resultará em aumentos do excedente agrícola, da renda do agricultor, da quantidade de empregos na agricultura e nas suas atividades conexas, do fortalecimento dos núcleos urbanos, do parque agroindustrial e da geração de impostos e da receita em divisas decorrente das exportações. Espera-se que tais efeitos favoreçam a redução de políticas intervencionistas de controle de preços e, portanto, a liberação de mercados, tornem a agricultura mais competitiva e a modernizem nas áreas semi-áridas nordestinas e promovam o desenvolvimento nacional. O Governo deverá ser o promotor desse desenvolvimento, através de medidas voltadas à adoção de tecnologias modernas que busquem a sustentabilidade, combinando o aumento da produtividade, a melhoria da qualidade dos produtos, a diversificação da produção e a necessária produção de excedentes de alimentos básicos com a melhoria da infra-estrutura econômica e social, promoção do desenvolvimento rural e assistência técnica e creditícia aos produtores e proteção ambiental.

3.4.2 Entraves e Limitações

Atualmente, em algumas regiões, conflitos de uso de água, mais graves, começam a surgir de forma cada vez mais preocupante, trazendo consigo a necessidade de soluções que compatibilizem demandas e disponibilidades.

Em 8 de janeiro de 1997, foi sancionada a Lei nº 9.433, criando a Política Nacional de Recursos Hídricos, que representa um novo marco institucional no país. Dentre os aspectos básicos dessa Lei, cita-se: adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, usos múltiplos dos recursos hídricos, a água é um bem finito e vulnerável, tem valor econômico, e gestão descentralizada e participativa. Foram, também, definidos os seguintes instrumentos, essenciais à gestão do uso da água: Plano Nacional de Recursos Hídricos, Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos, Cobrança pelo Uso de Água, Enquadramento dos Corpos D'água em Classes de Uso e Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.

3.4.3 Impactos Ambientais

Para a transformação da agricultura de sequeiro em irrigada, os aspectos ecológicos devem ser observados, uma vez que tanto a total desconsideração como a supervalorização do impacto ambiental não são benéficas ao desenvolvimento sustentado. Na elaboração de um projeto de irrigação, deve-se obter dados confiáveis, de forma a quantificar a magnitude dos impactos ambientais ocasionados pela sua implantação e a adoção das correspondentes medidas mitigadoras.

Uma vez em operação, deve-se considerar os aspectos ecológicos da região, procurando maximizar a produtividade e a eficiência do uso da água, manter as condições de umidade do solo e de fitossanidade favoráveis ao bom desenvolvimento da cultura irrigada, melhorar ou, no mínimo, manter as condições físicas, químicas e biológicas do solo, fatores esses que muito influenciarão na vida útil do projeto.

Não se pode concordar com aqueles que preconizam a não implementação de novos projetos de irrigação por causa de possíveis problemas ecológicos, mas também não se pode concordar com os que desconsideram totalmente os impactos ambientais decorrentes e se apoiam, somente, na relação custo - benefício. Na maioria dos casos,

é possível compatibilizar irrigação com proteção do meio ambiente. São comentados, a seguir, os mais freqüentes impactos ambientais inerentes à irrigação:

a) Modificação do Meio Ambiente:

A irrigação em grandes áreas contínuas e o seu cultivo intensivo têm causado distúrbios às condições naturais locais, eliminando a vegetação nativa e, como conseqüência imediata, alterando a microflora e fauna regionais, a produção de peixes, a população de insetos e as condições de erosão e de sedimentação na bacia hidrográfica. O aproveitamento racional requer, portanto, a manutenção de parte da área em condições naturais, preservando o ecossistema e servindo como local de refúgio e de reprodução da fauna. Outros impactos podem ser causados pela irrigação: prática da monocultura que, ao alterar a população de insetos, provoca maior demanda de inseticidas e geração de subprodutos industriais, como o vinhoto para cana-de-açúcar;

b) Salinização do Solo:

O termo salinidade se refere à presença, no solo, de sais solúveis; quando a concentração de sais se eleva ao ponto de prejudicar o rendimento econômico das culturas, diz-se que tal solo está salinizado.

A salinização do solo afeta a germinação e a densidade das culturas, bem como seu desenvolvimento vegetativo, reduzindo sua produtividade e, nos casos mais sérios, levando à morte generalizada das plantas. O processo de salinização (concentração de sais na solução do solo) ocorre, de maneira geral, em solos situados em regiões de baixa precipitação pluviométrica e que possuam lençol freático próximo da superfície.

De um modo geral, os solos situados em regiões áridas, quando submetidos à prática da irrigação, apresentam grandes possibilidades de se tornarem salinos, desde que não possuam um sistema de drenagem adequado. Estima-se que de 20 a 30% das

áreas irrigadas em regiões áridas necessitam de drenagem subterrânea para manter sua produtividade, sendo a irrigação e a drenagem ações afins.

Estimativas da FAO (1988) informam que, dos 250 milhões de hectares irrigados no mundo, aproximadamente, 50% já apresentam problemas de salinização e de saturação do solo e que 10 milhões de hectares são abandonados, anualmente, em virtude desses problemas.

As principais causas da salinização nas áreas irrigadas são os sais provenientes de água de irrigação e/ou do lençol freático, quando esse se eleva até próximo à superfície do solo. Pode-se afirmar que a salinização é subproduto da irrigação: uma lâmina de 100 mm de água, com concentração de sais de 0,5 g/l, aplicada à uma área de 1 hectare deposita, naquela área, 500 kg de sal. Quanto maior for a eficiência do sistema de irrigação, menor será a lâmina de água aplicada e, como consequência, menor será a quantidade de sal conduzida para a área irrigada, bem como o volume de água percolado e drenado.

O requerimento básico para o controle da salinidade, nas áreas irrigadas, é a existência da percolação e da drenagem natural ou artificial, garantindo o fluxo da água e do sal para abaixo da zona radicular das culturas. Nessa situação, não haverá salinização do solo. No local onde o dreno descarregar, entretanto, haverá aumento na concentração de sais. Aproximadamente 30% das áreas irrigadas dos projetos públicos no Nordeste apresentam problemas de salinização; algumas dessas áreas já não produzem;

c) Contaminação dos Recursos Hídricos:

O excesso de água aplicada na irrigação retorna aos rios, por meio do escoamento superficial e subsuperficial ou vai para os depósitos subterrâneos, por percolação profunda, arrastando consigo resíduos de fertilizantes, de defensivos, de herbicidas e de outros elementos tóxicos, denominados de sais solúveis. Os recursos

hídricos assim contaminados requerem tratamento apropriado quando destinados ao suprimento de água potável.

A contaminação das águas superficiais, notadamente de rios e córregos é rápida e acontece imediatamente após a irrigação. Tem-se verificado sérios problemas decorrentes da aplicação de herbicidas na irrigação por inundação; na irrigação por sulco, a água aplicada carrega, além de herbicidas, fertilizantes, defensivos e sedimentos. Também pode ocorrer de forma mais lenta, por meio do lençol freático subsuperficial, que recebe fertilizantes, defensivos e herbicidas dissolvidos na água aplicada. Essa contaminação pode ser agravada se houver sais solúveis no solo pois, ao se infiltrar, a água já contendo os sais aplicados na lavoura, ainda dissolverá os sais do solo, tornando-se mais prejudicial.

A contaminação da água subterrânea é bem mais lenta. O tempo necessário à percolação até o lençol subterrâneo aumenta com o decréscimo da permeabilidade do solo e com a profundidade do lençol. Aí reside um sério problema, pois só muito tempo após é que se saberá que a água subterrânea vem sendo poluída; esse problema se agrava quando os poluentes são: sais dissolvidos, nitratos, pesticidas e metais pesados.

Um estudo geológico prévio pode revelar concentração de sais solúveis no perfil do solo e indicar as áreas mais favoráveis, ou seja, com menor potencial de contaminação dos recursos hídricos. Quanto maiores as perdas por percolação e por escoamento superficial na irrigação, maiores serão as chances de contaminação dos mananciais e da água subterrânea. Torna-se necessário, cada vez mais, dimensionar e manejar os sistemas de irrigação com maior eficiência, bem como dosar corretamente os fertilizantes, herbicidas e defensivos;

d) Consumo Exagerado de Água:

A humanidade já passou por diversas crises, como de epidemias, de alimentos e de petróleo; provavelmente, as próximas crises serão de energia e de disponibilidade de água de boa qualidade. A crise de disponibilidade de água afetará a irrigação e será afetada por ela.

Já surgem disputas pela água: o uso para irrigação, para hidroelétricas e para consumo humano e industrial. A implantação de vários projetos de irrigação, sem a prévia quantificação da vazão possível de ser usada, tem acarretado, em algumas bacias, falta d'água para as áreas situadas a jusante. Tem-se chegado ao extremo da total falta de água para o consumo humano, animal e da fauna, causando sérios impactos ambientais e conflitos entre os usuários, como por exemplo, o Mar Aral, na Rússia.

Com a crescente competição pela água, alguns setores da sociedade e os movimentos ecológicos vêm conscientizando a população sobre a importância da preservação do meio ambiente; a legislação, por sua vez, vem sendo aperfeiçoada. Com isso, deverá haver maior pressão para que a irrigação seja praticada com maior eficiência e com o mínimo possível de impacto no meio ambiente, notadamente no que diz respeito à disponibilidade e qualidade de água para as múltiplas atividades; e,

e) Problemas de Saúde Pública:

A prática da irrigação pode acarretar problemas de saúde pública relacionados com a contaminação do irrigante, da comunidade próxima à área irrigada e do consumidor dos produtos irrigados. Os principais problemas são a propagação da esquistossomose, a proliferação de mosquitos e a ocorrência de verminoses. Os critérios de análise de projetos de irrigação, além de custo - benefício, produtividade e produção total, deverão, cada vez mais, considerar os aspectos relacionados com a saúde pública e com os impactos ambientais. Nesse sentido, o objetivo da irrigação não

deve se limitar ao aumento da produtividade dos cultivos e da produção de alimentos mas, abranger, também, a preservação da saúde dos trabalhadores e dos consumidores, a proteção do meio ambiente e, principalmente, o aumento do bem-estar da população.

3.5 Por que chove no semi-árido nordestino?

“ Normalmente nos perguntamos por que, num país como o Brasil, com tanta abundância de água, sob o predomínio de climas tropicais, há uma região castigada pelas secas como o semi-árido nordestino. De fato essa área apresenta diferenças em relação à imagem dos ambientes tropicais, em geral úmidos, sendo por isso considerada anômala. Entretanto, nessa região não ocorre nenhum fenômeno atmosférico fora dos padrões: a situação de aridez é explicável de acordo com a lógica da circulação atmosférica, não apresentando nada de incompreensível.

Tendo em conta o conjunto do sistema atmosférico em sua diversidade interna, a melhor maneira de realizar estudos climáticos é verificando as direções do movimento das massas de ar. O que se nota é que o ar se movimenta dentro de circuitos fechados, portanto células gigantescas. Assim, foram detectados dois circuitos básicos: direção oeste-leste, que é a célula de *Walker*, e direção norte-sul, que é a célula de *Hadley*. No caso do Nordeste brasileiro, o trecho semi-árido é atingido pelo ar subsidente dessas duas células. Com relação à direção oeste-leste (célula de *Walker*), vimos que a origem do ar subsidente está na Amazônia. Lá há ascensão de muito ar úmido, que sobe até cerca de 15 quilômetros de altura, com movimentos descendente de massas de ar secas sobre toda a região subtropical sul do Atlântico, incluindo o Nordeste do Brasil. Por outro lado, sobre o Atlântico equatorial, numa faixa longitudinal denominada zona de convergência intertropical, também há muita ascensão de ar úmido, com formação de nebulosidade e ocorrência de precipitação. Esse ar que sobe no hemisfério norte

desce, em parte no sentido sul (célula de Hadley), atingindo alguns Estados do Nordeste, o Ceará, por exemplo.

As massas descendentes das células de Hadley e de Walker que incidem sobre o Nordeste brasileiro são secas e, como estão orientadas em direção à superfície, impedem que se produza sobre o Nordeste a ascensão de ar indispensável à formação de nuvens. Está aí estabelecida a principal causa das secas no semi-árido, cujas conseqüências para a cobertura vegetal se fazem notar pelo predomínio da caatinga e, para o ciclo hidrológico, pela existência de rios intermitentes e solos pedregosos.

Porém essa semi-aridez da região não é explicada apenas por fatores naturais. Ela é realimentada por circunstâncias locais decorrentes da sobrecarga que o ser humano está impondo ao ambiente, o que justifica o diagnóstico de que essa área já estaria vivendo um verdadeiro processo de desertificação.”

(fonte: OLIVA, J. & GIANANTI, R 1999).

“ A verdade é que nós todos sabemos muito bem o que se fazer no Nordeste. O Nordeste teve um desenvolvimento considerável nestes últimos 20 ou 30 anos. Urbanizou-se, tem uma classe média bem instalada, e deixou esses 10 milhões de nordestinos na zona semi-árida, mais ou menos ao abandono, dependendo de uma ajuda circunstancial para sobreviver. Não há nenhuma região semi-árida no mundo tão povoada como o Nordeste [...]. A coisa perversa da estrutura agrária do Nordeste é que não existe um sistema de assalariados propriamente. A massa da população é de meeiros. Meeiro em terra de latifundiário trabalha sob a forma de participação em produtos, é pago em produto natural. Produz para comer [...] Quando acontece uma seca, toda a estrutura sofre, mas o peso maior é suportado pelos que estão embaixo. A seca, na verdade, é o colapso da produção agrícola, e esse colapso se traduz em fome [...] quando ocorre uma seca se lança mão de uma ajuda de emergência. Essa ajuda se tornou muito mais fácil nos últimos anos [...] Mas é preciso estar preparado: prever e lançar os projetos na hora certa. Por outro lado, é preciso que esses projetos não fiquem sendo manipulados pelos grupos locais [...] Hoje existem muitos recursos para a

previsão, e sabe-se mais ou menos a probabilidade da ocorrência da seca [...] Como já disse, há a indústria da seca, gente que ganha com a seca, por que ela significa muito dinheiro do governo chegando para o comércio, para financiar as frentes de trabalho, etc. A seca é um negócio. Na Paraíba, por exemplo, havia as fortunas feitas pela seca: diversas fortunas de Campina Grande decorriam de vantagens públicas.”

(Fonte: Celso Furtado, Seca e poder).

3.6 Resumo

Na revisão da literatura observou-se que, de uma maneira geral, os modelos de programação matemática aplicados em planejamentos e gerenciamentos de recursos hídricos, com ênfase na irrigação, são freqüentemente formulados estabelecendo como função objetivo a maximização da renda líquida anual, sujeita às restrições na disponibilidade de água e outros recursos. Devido a consideração da escassez do recurso hídrico, a maioria dos modelos foram desenvolvidos no sentido de selecionar cultivos e respectivas áreas de irrigação, para serem exploradas em condições limitantes de água. Foi tratado neste trabalho algo simultâneo com a pesquisa bibliográfica, sendo que no estudo de caso do reservatório Engenheiro Arcoverde, localizado no município de Condado, Estado da Paraíba, região de altos conflitos de água por ocorrência de grandes estiagens e pela falta de empregos diretos e indiretos.

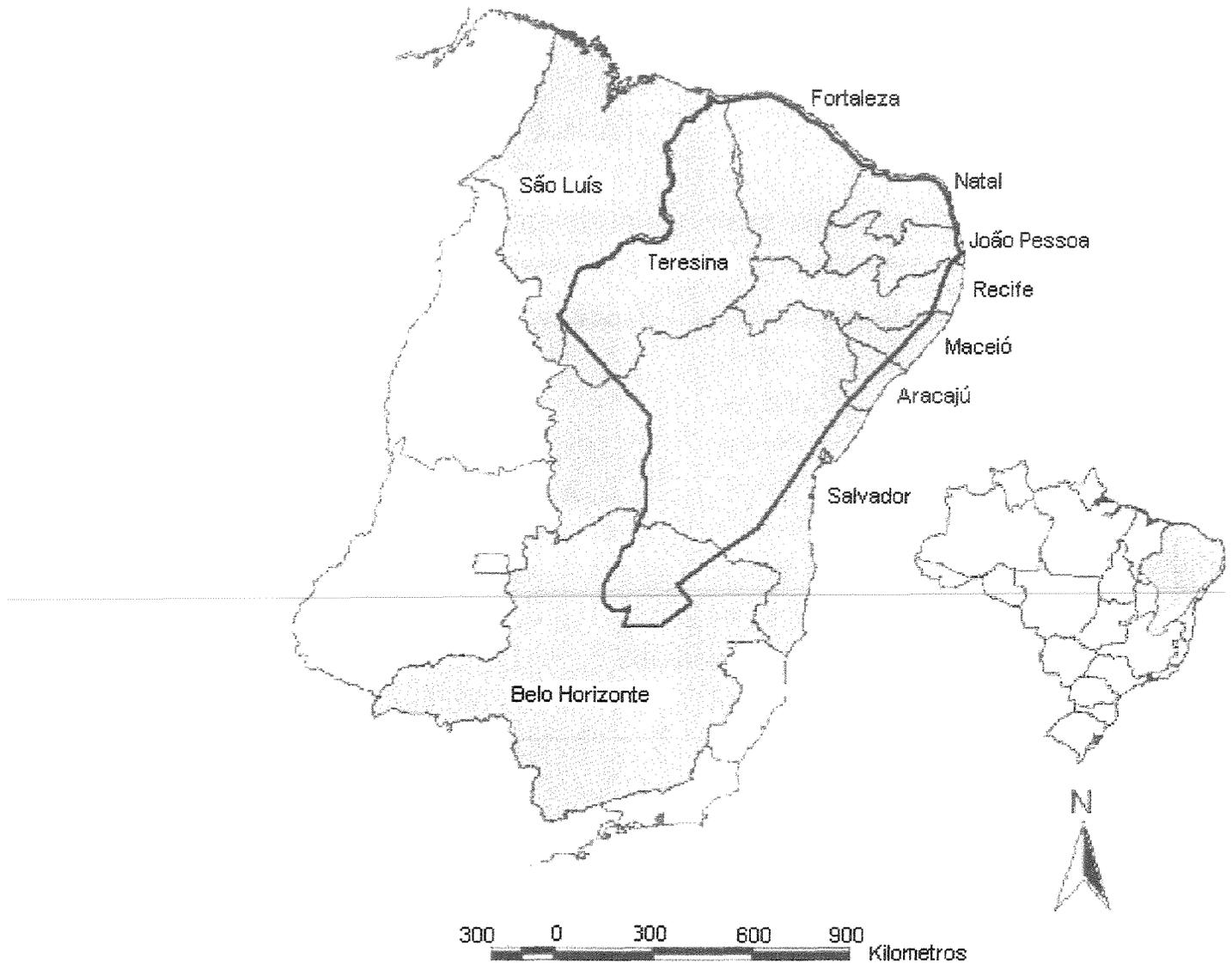
4 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

Neste capítulo situa-se a região em estudo e dá suas principais características.

4.1 Localização, Extensão e Hidrografia

Para a formulação do modelo (capítulo 6) considerou-se uma área irrigável de 230 ha e uma disponibilidade de água igual à do reservatório Engenheiro Arcoverde de regime plurianual com capacidade máxima de 35.000.000 m³. O sistema em estudo é composto pelo reservatório Engenheiro Arcoverde e seu perímetro de irrigação os quais estão inseridos numa região do Nordeste do Brasil situada no chamado “polígono das secas” (Figura 4.1), a noroeste do Estado da Paraíba, numa altitude de 250 metros sob coordenadas geográficas de 6° 54' 30" de latitude sul e 37° 35' 50" de longitude a oeste de Greenwich; esta região é parte integrante da bacia do Médio Piranhas (Figura 4.2) a qual situa-se no quadrante noroeste da Paraíba e faz parte do conjunto das seis sub-bacias que compõe a bacia do rio Piranhas. Na bacia do Médio Piranhas (Figura 4.3) estão inseridos os municípios de Condado e Malta que são abastecidos pelo reservatório Engenheiro Arcoverde. A região em estudo é constituída pela Bacia Hidrográfica de Drenagem (BHD) do açude Engenheiro Arcoverde e apresenta uma área de 124 km². A Figura 4.4 mostra a BHD, destacando o reservatório Engenheiro Arcoverde, seus afluentes que são de regime intermitente e a densidade de açudes a montante do reservatório Engenheiro Arcoverde.

Localização do Polígono das Secas, no Espaço Físico Brasileiro



 Estados do Polígono das Secas  Limite do Polígono

Figura 4.1 - Delimitação do “Polígono das Secas” no espaço físico brasileiro, com os respectivos estados. Fonte: O Estado das Águas no Brasil: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos. Brasília, DF: ANEEL, 1999. pág 277.



Figura 4.2 - Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba, destacando a bacia hidrográfica do Médio Piranhas.

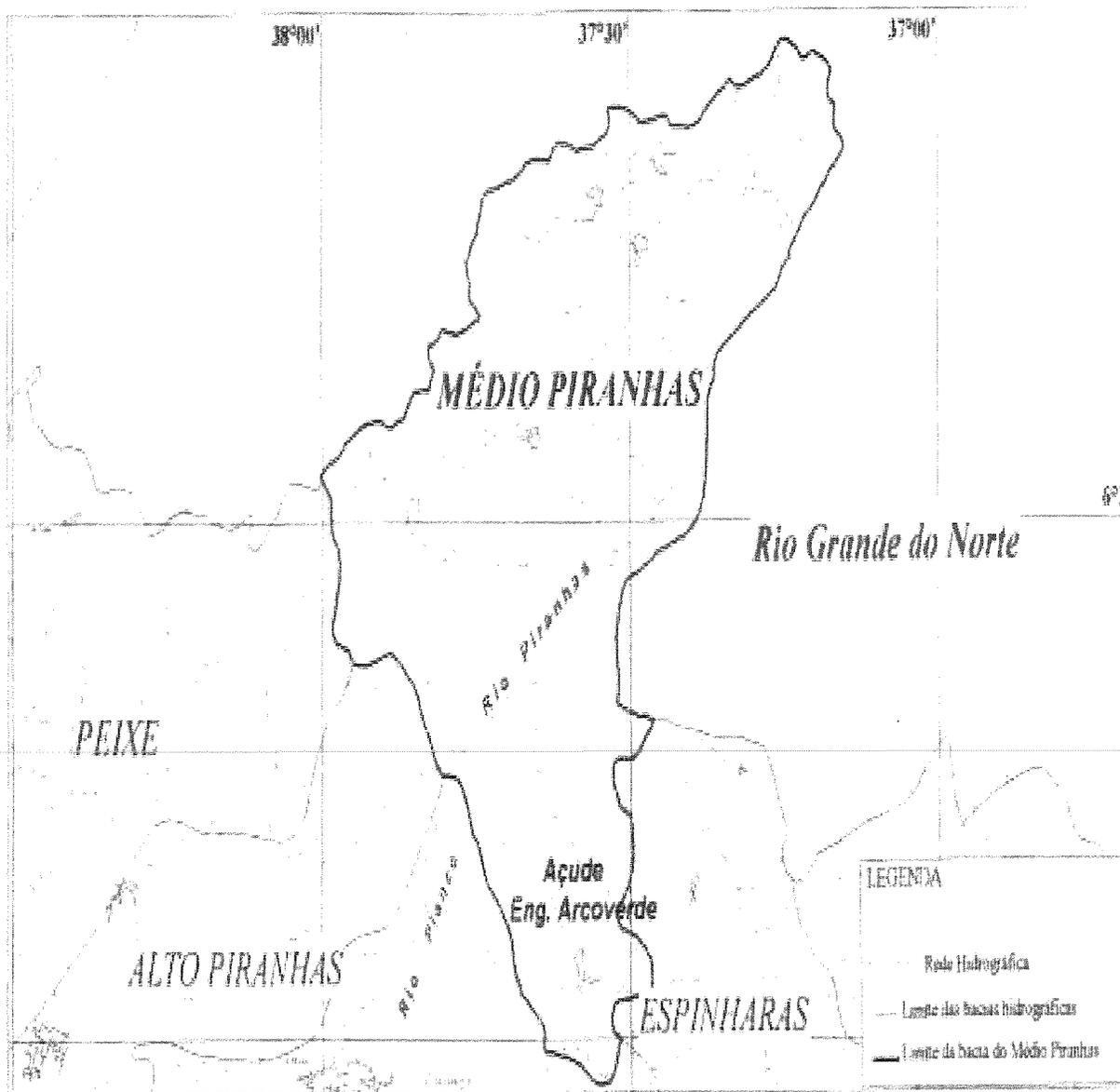


Figura 4.3 – Bacia Hidrográfica do Médio Piranhas. Fonte: Carta da Sudene-DRN (Divisão de Cartografia) da Folha SB-24-Z-A-VI Pombal e da Folha SB-24-Z-A-IV Serra Negra do Norte.

4.3 Temperatura

Com base nos dados obtidos do Atlas Climatológico do Estado da Paraíba, a temperatura média mensal na região do município de Condado varia de 24°C a 27°C. Os meses mais quentes correspondem ao período de outubro a dezembro, e os menos quentes de maio a agosto. Como é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Temperatura Mínima, Máxima e Média (°C).

Mês	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)
Janeiro	22,0	33,0	27,0
Fevereiro	22,0	32,0	26,0
Março	21,5	31,0	25,5
Abril	21,5	31,5	25,0
Maio	20,5	30,0	25,0
Junho	19,5	29,5	24,0
Julho	19,0	30,0	24,0
Agosto	19,0	31,0	24,5
Setembro	20,0	32,5	26,0
Outubro	21,0	33,5	26,0
Novembro	21,0	34,0	27,0
Dezembro	21,5	33,5	27,0
Média	21,0	31,5	25,5

Fonte: Atlas Climatológico do Estado da Paraíba -1987.

4.4 Umidade relativa do ar

Por falta de estação climatológica na região em estudo, procurou-se outra região com características fisiográficas semelhantes, que possa retratar bem a região em estudo. A média mensal da umidade relativa do ar, obtida de dados registrados no posto climatológico de Patos, distante 35 km de Condado, dão uma idéia do comportamento desta variável na região em estudo. Os dados medidos neste posto apresentam valores médios anuais de 49%, e são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Umidade relativa do ar (%) - Posto de Patos - PB.

Mês	Umidade Relativa Média (%)
Janeiro	47
Fevereiro	53
Março	60
Abril	57
Mai	54
Junho	51
Julho	48
Agosto	44
Setembro	42
Outubro	41
Novembro	42
Dezembro	44
Média	49

4.5 Velocidade do Vento

Em virtude de não se ter estação climatológica na região do reservatório Engenheiro Arcoverde, adotou-se para o estudo dos ventos a estação climatológica de Patos, que representa bem a região em estudo, onde os anemômetros a 0,5 m do solo dão uma idéia do comportamento do vento nessa região que varia em média mensalmente de 2 m/s a 3 m/s. (Fonte: Atlas Climatológico do Estado da Paraíba - 1987).

4.6 Insolação

A duração efetiva do dia (número de horas de 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 (Fonte: Atlas Climatológico do Estado da Paraíba - 1987).

4.7 Evaporação

A evaporação média mensal da bacia hidrográfica do reservatório Engenheiro Arcoverde é estimada a partir de dados do Tanque Classe A operado pela SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste) no posto de Patos. Em muitos meses do ano, a média evaporimétrica registrada é superior ao valor precipitado com valores máximos em torno de 350 mm e mínimos de 150 mm, a média anual situa-se em torno de 2200 mm, como é mostrada na Tabela 4.3 abaixo.

Tabela 4.3 - Distribuição média mensal de evaporação, período de 1963 à 1983.

Mês	Evaporação Média (mm)
Janeiro	201,0
Fevereiro	152,3
Março	145,5
Abril	129,8
Mai	133,5
Junho	138,8
Julho	163,5
Agosto	200,3
Setembro	220,3
Outubro	237,8
Novembro	235,5
Dezembro	224,5
Total	2182,8 mm

4.8 Regime Pluviométrico

Considerando os dados dos postos pluviométricos das cidades de Condado e Malta, a pluviometria anual média da bacia no período de 1963 - 1983 situa-se em torno de 850 mm, tendo como período chuvoso os meses de janeiro até maio, sendo o trimestre mais chuvoso fevereiro, março e abril. Durante o resto do ano a região fica sob os efeitos de estiagem prolongada com os meses de agosto, setembro e outubro representando o trimestre mais seco.

Tabela 4.4 - Precipitação média mensal da bacia hidrográfica do açude Engenheiro Arcoverde (1963 - 1983).

Mês	Precipitação Média (mm)
Janeiro	84,5
Fevereiro	147,0
Março	212,8
Abril	157,0
Mai	78,8
Junho	46,0
Julho	23,6
Agosto	12,2
Setembro	7,0
Outubro	10,5
Novembro	25,6
Dezembro	41,2
Total	846,2 mm

Observa-se que nos meses de fevereiro, março e abril, ocorrem as maiores precipitações, totalizando 61% do total.

A seguir, é mostrado na Tabela 4.5 as precipitações mensais no posto de Condado no período de 1973 a 1991.

Tabela 4.5 - Precipitação mensal no posto de Condado (mm), no período de 1973 -1991

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Anual
1973	75,8	45,1	142,5	387,1	118,0	47,6	23,8	12,0	4,8	15,1	2,1	26,1	900,0
1974	213,1	255,4	266,6	431,2	132,2	33,7	21,9	1,5	9,7	14,5	45,0	30,4	1455,2
1975	62,1	277,4	285,2	245,1	113,8	28,7	58,2	4,2	0,1	2,0	3,3	23,8	1103,9
1976	28,6	148,2	235,7	127,4	44,9	7,0	2,9	1,5	8,6	33,9	16,0	14,7	669,4
1977	80,7	102,0	207,3	279,0	99,2	31,6	29,7	8,4	3,2	4,5	5,9	47,0	898,6
1978	55,5	198,5	140,3	185,1	140,9	86,4	67,3	14,0	8,8	5,7	17,0	3,5	922,9
1979	64,0	138,2	125,7	132,0	66,1	20,7	10,8	5,9	24,9	32,9	36,6	26,9	684,6
1980	56,2	219,0	115,7	46,7	8,4	17,3	7,6	6,1	8,9	13,1	17,6	10,9	527,6
1981	81,1	21,6	391,9	41,4	7,3	14,9	7,2	6,1	7,8	7,9	34,4	27,4	649,0
1982	20,8	44,4	84,7	237,7	53,2	13,9	9,9	7,0	8,3	7,6	12,2	17,9	517,5
1983	33,6	99,9	132,4	46,8	14,1	11,1	8,1	9,2	7,8	13,0	4,8	9,5	390,3
1984	33,2	27,8	195,2	279,2	103,0	14,1	19,0	12,3	3,6	9,4	10,7	9,0	716,5
1985	146,2	422,1	257,2	362,4	86,3	118,5	13,9	7,2	6,4	10,9	10,1	84,1	1525,4
1986	116,3	240,6	320,8	206,0	44,3	15,1	15,5	11,9	6,8	7,1	15,5	12,9	1012,9
1987	40,8	98,3	319,6	53,1	11,3	25,3	7,5	5,3	4,3	4,6	5,5	4,2	579,7
1988	41,2	89,2	208,7	347,9	78,2	8,7	16,4	7,0	4,3	4,6	3,9	34,6	844,8
1989	44,9	65,1	151,9	420,2	128,3	45,5	67,6	8,8	4,3	5,2	4,2	107,	1053,7
1990	10,1	61,1	10,7	81,4	25,9	48,1	11,7	33,7	8,3	11,4	5,6	75,6	383,6
1991	70,0	88,7	269,9	52,3	93,6	12,5	73,9	11,5	12,4	77,6	34,2	13,1	809,8

A seguir, é mostrado na Tabela 4.6 as precipitações mensais no posto de Malta no período de 1973 a 1991.

Tabela 4.6 - Precipitação mensal no posto de Malta (mm), no período de 1973 –1991.

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Anual
1973	69,8	41,5	131,1	356,2	108,6	43,8	21,9	11,0	4,4	13,9	1,9	24,1	828,2
1974	196,1	235,0	245,3	396,8	121,7	31,0	20,1	1,4	9,0	13,3	41,4	28,0	1339,2
1975	57,1	255,3	262,5	225,6	104,7	26,4	53,5	3,9	0,1	1,9	3,0	21,9	1015,9
1976	26,4	136,4	216,9	117,2	41,3	6,4	2,6	1,4	7,9	31,2	14,8	13,5	616,0
1977	74,3	93,9	190,8	256,8	91,3	29,1	27,3	7,8	2,9	4,1	5,4	43,2	827,0
1978	51,1	182,7	129,1	170,4	129,6	79,5	61,9	12,9	8,1	5,3	15,7	3,2	849,3
1979	58,9	127,2	115,6	121,5	60,8	19,0	10,0	5,4	22,9	30,3	33,7	24,8	630,0
1980	51,7	201,5	106,5	43,0	7,8	16,0	7,0	5,7	8,2	12,0	16,2	10,0	485,5
1981	74,6	19,9	360,7	38,1	6,7	13,7	6,6	5,7	7,2	7,3	31,6	25,2	597,3
1982	19,2	40,8	77,9	218,7	49,0	12,8	9,1	6,4	7,6	7,0	11,2	16,5	476,3
1983	30,9	91,9	121,8	43,0	13,0	10,3	7,5	8,5	7,2	12,0	4,4	8,7	359,2
1984	30,6	25,5	179,6	257,0	94,8	13,0	17,4	11,4	3,3	8,7	9,8	8,2	659,4
1985	134,5	388,5	236,7	333,5	79,4	109	12,8	6,6	5,9	10,1	9,3	77,4	1403,8
1986	107,0	221,4	295,2	189,6	40,7	13,9	14,3	11,0	6,3	6,6	14,3	11,9	932,2
1987	37,5	90,4	294,2	48,8	10,4	23,3	6,9	4,9	3,9	4,3	5,0	3,8	533,5
1988	37,9	82,1	192,1	320,1	72,0	8,0	15,1	6,5	3,9	4,3	3,6	31,8	777,5
1989	41,3	59,9	139,8	386,7	118,1	41,9	62,2	8,1	3,9	4,8	3,8	99,1	969,7
1990	9,3	56,2	9,9	74,9	23,9	44,3	10,8	31,0	7,6	10,5	5,2	69,5	353,1
1991	64,4	81,7	248,3	48,1	86,2	11,5	68,0	10,6	11,4	71,4	31,5	12,1	745,2

A seguir, é mostrado na Tabela 4.7 as precipitações médias mensais na bacia hidrográfica do reservatório Engenheiro Arcoverde (mm), no período de 1973 a 1991.

Tabela 4.7 - Precipitação total mensal na bacia hidrográfica do reservatório Engenheiro Arcoverde (mm), no período de 1973 - 1991.

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Anual
1973	78,2	46,5	147,0	399,4	121,8	49,1	24,6	12,4	4,9	15,6	2,2	27,0	928,5
1974	219,9	263,5	275,0	444,9	136,4	34,8	22,6	1,6	10,1	15,0	46,4	31,4	1501,4
1975	64,1	286,2	294,3	252,9	117,4	29,6	60,0	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	3,0	1,5	8,9	35,0	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	191,0	145,3	89,1	69,4	14,5	9,1	5,9	17,6	3,6	952,2
1979	66,0	142,6	129,7	136,2	68,2	21,4	11,2	6,1	25,7	34,0	37,8	27,8	706,3
1980	58,0	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	11,0	9,2	739,2
1985	150,8	435,5	265,4	373,9	89,0	122,3	14,4	7,4	6,6	11,3	10,4	86,8	1573,7
1986	120,0	248,2	330,9	212,6	45,7	15,6	16,0	12,3	7,1	7,4	16,0	13,3	1045,0
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	9,0	16,9	7,3	4,4	4,8	4,0	35,7	871,6
1989	46,4	67,2	156,7	433,6	132,4	47,0	69,7	9,1	4,4	5,4	4,3	111,1	1087,1
1990	10,5	63,0	11,1	84,0	26,8	49,6	12,1	34,8	8,5	11,8	5,8	78,0	395,8
1991	72,2	91,6	278,4	54,0	96,6	12,9	76,3	11,9	12,8	80,1	35,3	13,5	835,5

4.9 Vegetação

A associação de plantas nativas que revestem a área é típica da região fisiográfica formada por uma mistura de ervas e trepadeiras, com arbustos e árvores, mais ou menos esparsos. A caatinga hiperxerófila é predominante na região 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, Carabeira, Velame e Capim Pé de Galinha.

4.10 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.

4.11 Solos

Observa-se na bacia hidrográfica do açude a predominância dos seguintes tipos de solos: Bruno Não Cálcico Vérticos e Não Vérticos de pouca espessura, associados com solos Litólicos Eutróficos e solos Aluviais restritos as faixas estreitas. A jusante da barragem predominam os solos Podzólicos Vermelho Amarelo Eutróficos existentes nos interflúvios, principalmente nas áreas cortadas por afluentes da margem esquerda do rio Piranhas.

Foi feito através do Mapa Pedológico da Paraíba um reconhecimento do solo para um raio de 10 km da barragem correspondente uma área de 315,5 km². Tendo como resultado:

- 74,96% de solo Bruno Não Cálcico;
- 18,69% de Litólico Eutrófico;
- 6,34% de Aluvião.

Observação: o solo Bruno Não Cálcico tem uma conformação de solos rasos e duros, mas muitos ricos em componentes químicos.

4.12 Reservatório Engenheiro Arcoverde

A seguir, descrevem-se os dados técnicos do reservatório Engenheiro Arcoverde, juntamente com as informações sobre o perímetro de irrigação de Condado.

4.12.1 Dados técnicos

O açude público Engenheiro Arcoverde (Figura 4.5) localiza-se no município de Condado - PB cujos limites geográficos são os seguintes:

- Ao Norte - Município de Desterro de Malta - PB.
- Ao Sul - Município de Catingueira - PB.
- Ao Leste - Município de Malta - PB.
- Ao Oeste - Município de Pombal - PB.

Foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) num período de cinco anos (1932 - 1936) para ter uma capacidade de acumulação de 35.000.000 m³ (trinta e cinco milhões de metros cúbicos) e com a finalidade inicial de dotar o semi-árido nordestino de uma estrutura hidráulica para combater os efeitos das secas periódicas e das irregularidades das chuvas. Este empreendimento visa, também, atender a demanda das cidades de Condado e Malta com 7255 e 5728 habitantes (IBGE, 1996), respectivamente, e posteriormente, ao perímetro de irrigação ali implantado.

O açude Engenheiro Arcoverde pertencente à bacia do médio Piranhas barra o riacho Mata Fome que é afluente do riacho Gado Bravo, este por sua vez é afluente do rio Piranhas pela margem direita.

Dados técnicos da barragem (PROJETO ENGENHEIRO ARCOVERDE, 1971):

- a) tipo: barragem de terra homogênea;
- b) taludes: montante - 2:1; jusante - 2:1;
- c) altura máxima: 20,76 m;
- d) extensão do coroamento: 1.079 m;
- e) largura do coroamento: 7 m;
- f) largura máxima da base: 91,6 m;
- g) perímetro da bacia hidrográfica de drenagem: 68,67 km;
- h) comprimento do maior afluente: 19,55 km;
- i) área da bacia hidrográfica de drenagem: 124 km²;
- j) cota de tomada d'água: 7,10 m;
- k) volume morto: 3.010.000 m³;
- l) diâmetro da tubulação de tomada d'água: 900 mm;
- m) qualidade da água do reservatório: C1-S1 (boa qualidade para irrigação).

O açude é atualmente administrado pela Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba (CAGEPA) e, segundo a mesma, a demanda das cidades de Condado e Malta totalizam uma vazão de 35.585,83 m³/mês ou 427.030 m³/ano. A cidade de Condado fica a 1 km distante da estação de bombeamento a qual fica vizinha ao reservatório e é suprida com uma vazão de 35 m³/h através de um sistema com duas bombas de 15 CV funcionando 24 horas por dia. A cidade de Malta fica 9 km distante da estação de bombeamento e é suprida com uma vazão de 46 m³/h através de um sistema com duas bombas de 30 CV funcionando 24 horas por dia. (Dados fornecidos pela CAGEPA).

4.12.2 Perímetro de Irrigação de Condado

O perímetro de irrigação de Condado dispõe de 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 de riacho das Timbaúbas e dos canais principais e secundários de irrigação existentes. Os canais têm estrutura de concreto armado e seção trapezoidal (Figura 4.6), sendo que os principais são chamados de P1 (canal leste) e P2 (canal oeste). As seções dos canais são distribuídas conforme Tabela 4.8 abaixo:

Tabela 4.8 – Seções dos canais de irrigação.

Canais	Principais	Secundários
Base maior (m)	1,50	0,80
Base menor (m)	0,70	0,40
Altura (m)	1,20	0,60
Extensão dos canais (m)	15.088	36.000

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 (ramo via Paraíba da Transamazônica), a principal do Estado, margem da qual a bacia de irrigação se localiza e cuja barragem serve de passagem à mesma.

A seguir, são apresentadas as distâncias, por via rodoviária, de Condado às principais cidades circunvizinhas.

Distância de Condado à:

Patos.....	38 km
Pombal	37 km
Souza	97 km
Santa Luzia.....	79 km
Cajazeiras	140 km
Soledade	151 km
Campina Grande.....	209 km
João Pessoa	330 km.

Este perímetro abrange uma área de 459,3 ha, sendo que 230 ha são de agricultura irrigada e 229,3 ha de agricultura de sequeiro. O perímetro atende atualmente 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 culturas instaladas, atualmente, são irrigadas através dos métodos: sulco, aspersão e gotejamento.

O perímetro irrigado (Figura 4.7) é alimentado pelo açude com uma vazão máxima de 0,6 m³/s, ao custo de R\$ 12,90/1000 m³ de água. A alimentação é efetuada por canais de concreto armado de seção trapezoidal com uma extensão de 15.088 m de canal principal e 36.000 m de canal secundário.

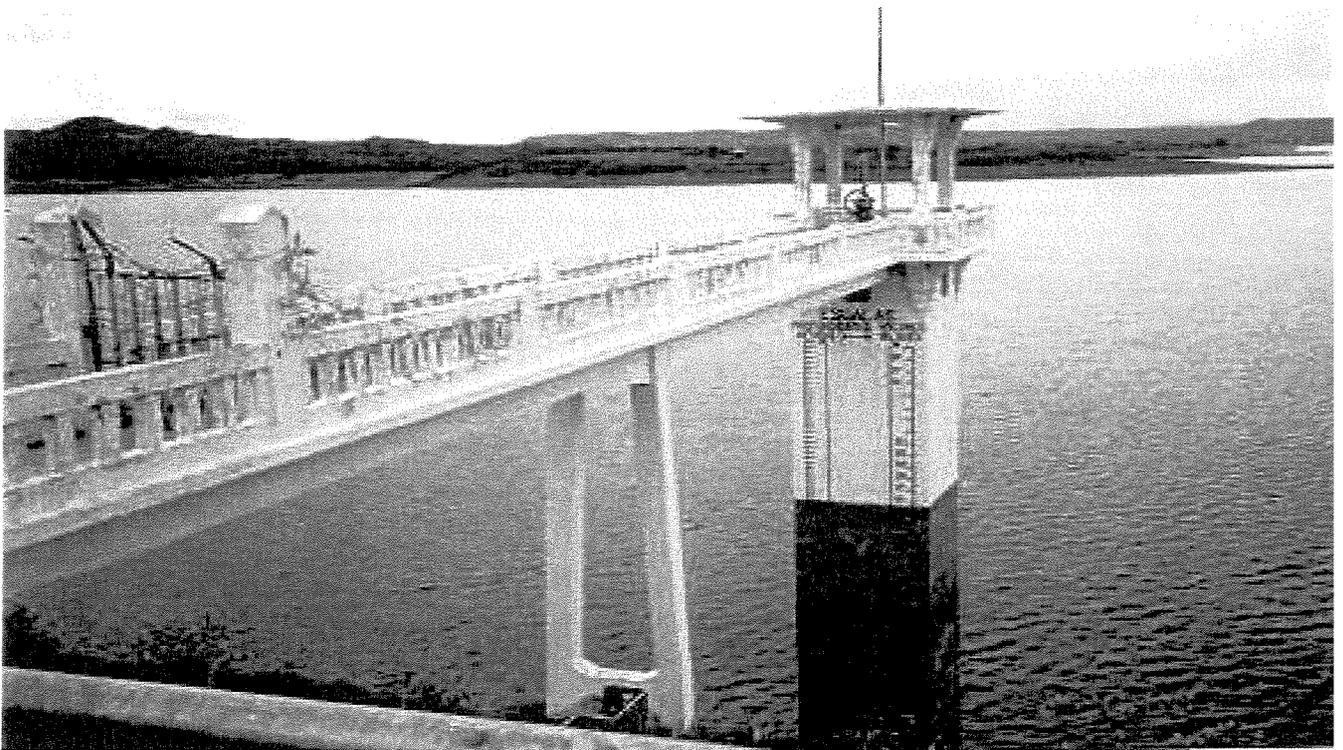


Figura 4.5 - Reservatório Engenheiro Arcoverde.



Figura 4.6 - Canais de Irrigação.



Figura 4.7- Perímetro Irrigado.



Figura 4.8 - Vista do município de Condado e do Perímetro Irrigado.

5 OS DADOS HIDROCLIMATOLÓGICOS DO SISTEMA EM ESTUDO

Neste capítulo descrevem-se os dados de entrada usados na operação do modelo de otimização, como também a forma de obtê-los. O modelo envolve a operação do reservatório e perímetro de irrigação, situados no município de Condado, Estado da Paraíba.

5.1 Introdução

O modelo necessita de dados hidrológicos de demanda hídrica, relacionados às culturas, característicos do reservatório e do perímetro de irrigação. Alguns dados de entrada do modelo, por não possuírem séries históricas disponíveis, foram simulados, como foi o caso das vazões afluentes geradas através do modelo chuva-deflúvio Tank Model. Os dados, em sua forma bruta, foram obtidos através dos seguintes órgãos: LRMS (Laboratório de Meteorologia e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba), CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba), DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Administração do Perímetro Irrigado de Condado, EMBRAPA (Empresa Brasileira Agropecuária), SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste), DNAEE (Departamento Nacional de Abastecimento de Água e Energia Elétrica) e ATECEL (Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior).

5.2 Dados Hidrológicos de Entrada do Modelo

Para fazer uma análise da consistência dos dados hidrológicos utilizados (precipitação, evaporação, demandas hídricas, afluxos), os quais são necessários como dados de entrada do modelo, utilizou-se a equação do balanço hídrico para o período de 1974 - 1980 com os volumes observados cedidos pelo LRMS.

5.2.1 Balanço Hídrico do Reservatório Engenheiro Arcoverde

O balanço hídrico do reservatório Engenheiro Arcoverde foi feito para o período de 1974 a 1980 (84 meses - período em que o perímetro irrigado estava em plena atividade) e representa as variações de seus armazenamentos mensais ao longo do período.

5.2.1.1 Volume observado do reservatório

Os dados de volumes armazenados no reservatório no período de 1974 a 1980 que serviram de base para comparar com os volumes simulados pela equação do balanço hídrico foram monitorados pelo LRMS (Laboratório de Meteorologia e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba). Na Tabela 5.1 estão descritos os valores dos volumes observados. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram as curvas Cota x Volume e Cota x Área do reservatório Engenheiro Arcoverde, respectivamente (RIBEIRO, 1990).

Tabela 5.1 - Volume ao fim de cada mês observado no reservatório para o período de 1974 - 1980 em m³.

Ano/mês	1974	1975	1976	1977
Jan	15.845.622	25.829.952	24.580.227	8.012.495
Fev	25.098.450	29.909.185	23.663.762	8.956.285
Mar	31.548.600	34.837.430	22.622.325	11.907.355
Abr	32.515.751	34.549.677	22.181.827	25.068.460
Mai	33.515.139	34.252.333	20.431.610	34.525.432
Jun	34.482.290	33.964.580	18.694.431	33.964.580
Jul	33.792.010	33.101.730	17.008.750	32.713.447
Ago	32.325.165	31.764.312	15.246.875	31.419.172
Set	30.258.320	30.340.610	13.815.375	29.520.902
Out	29.175.753	28.442.340	12.527.035	27.450.062
Nov	28.133.485	26.802.925	11.079.715	25.621.665
Dez	27.104.922	25.413.377	9.635.030	24.580.227

Ano/mês	1978	1979	1980
Jan	23.163.873	17.302.407	6.900.712
Fev	25.538.350	17.269.780	6.918.135
Mar	29.046.335	16.617.230	11.631.475
Abr	28.701.195	16.584.602	11.154.955
Mai	29.564.045	15.899.425	10.176.235
Jun	28.312.912	14.846.055	9.394.185
Jul	27.277.492	17.302.407	8.518.385
Ago	25.528.350	11.957.515	7.499.812
Set	23.788.735	10.652.355	6.620.118
Out	21.873.098	9.240.920	5.752.320
Nov	19.989.075	8.255.645	4.951.837
Dez	18.444.370	7.200.012	4.193.000

Fonte: Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba, LMRS-PB.

A seguir, é mostrado na Figura 5.1 o volume observado ao fim de cada mês no reservatório para o período de 1974 – 1980, em m³.

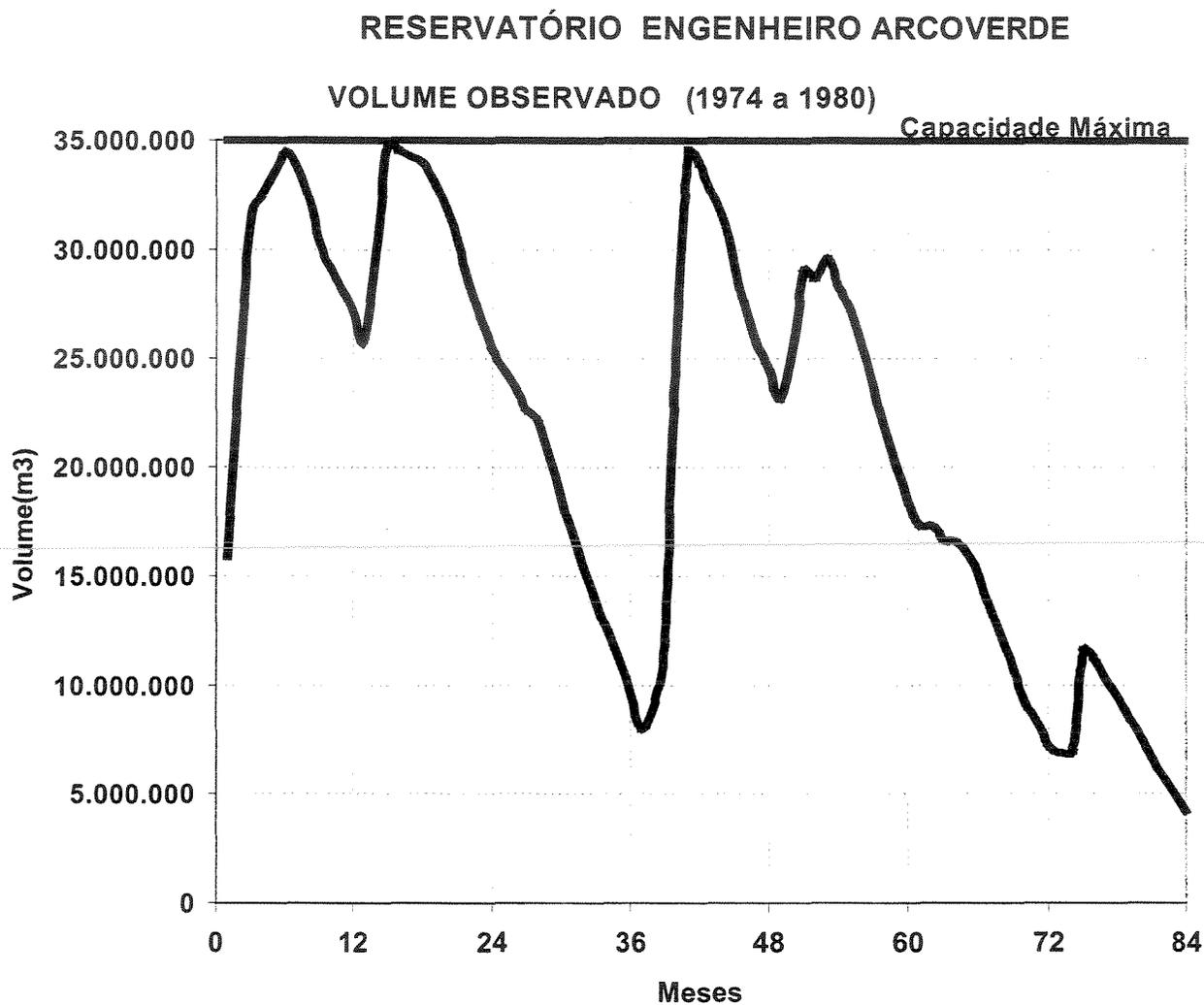


Figura 5.1 - Volumes ao fim de cada mês observado no reservatório para o período de 1974 – 1980, em m³.

A seguir, é mostrado na Figura 5.2 abaixo o volume médio anual observado entre 1973 e 1983 do reservatório Engenheiro Arcoverde.

Volume Médio Anual Observado de 1973 a 1983

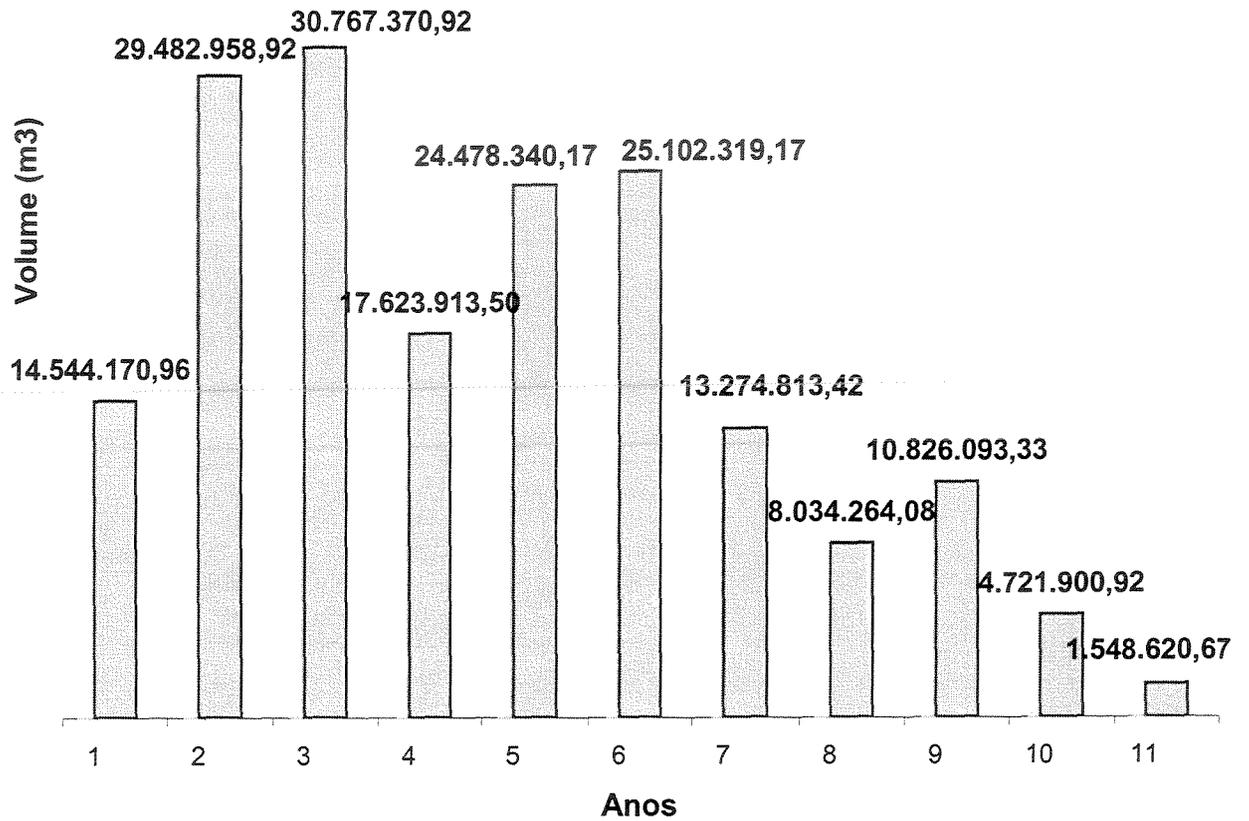


Figura 5.2 - Volume Médio Anual Observado entre 1973 e 1983.

A seguir, é mostrado na Figura 5.3 a curva Cota x Volume do reservatório Engenheiro Arcoverde.

Gráfico Cota x Volume para o açude Eng. Arcoverde

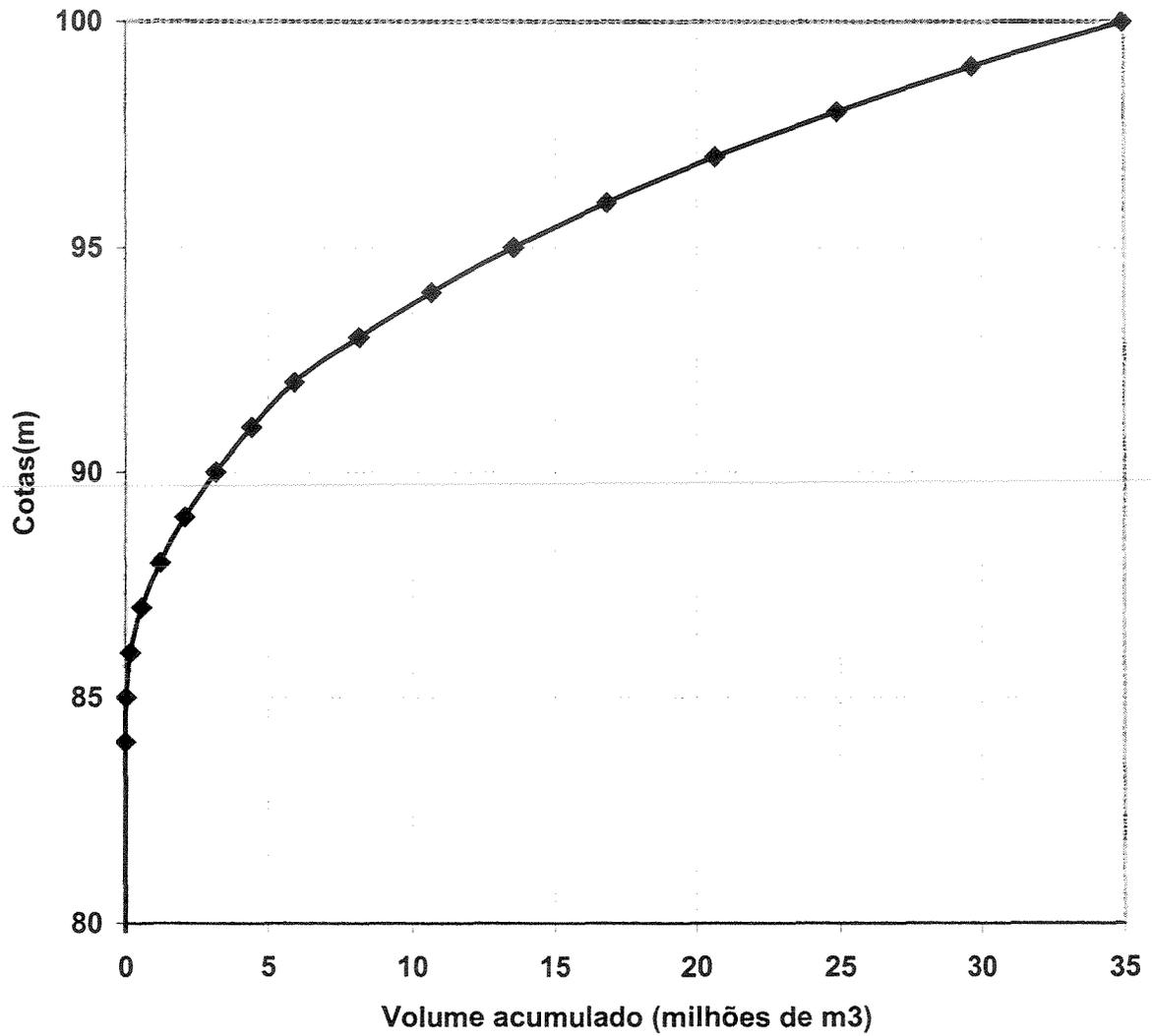


Figura 5.3 - Curva Cota x Volume do reservatório Engenheiro Arcoverde.

A seguir, é mostrado na Figura 5.4 a curva Cota x Área do reservatório Engenheiro Arcoverde.

Gráfico Cota x Área inundada para o açude Eng. Arcoverde

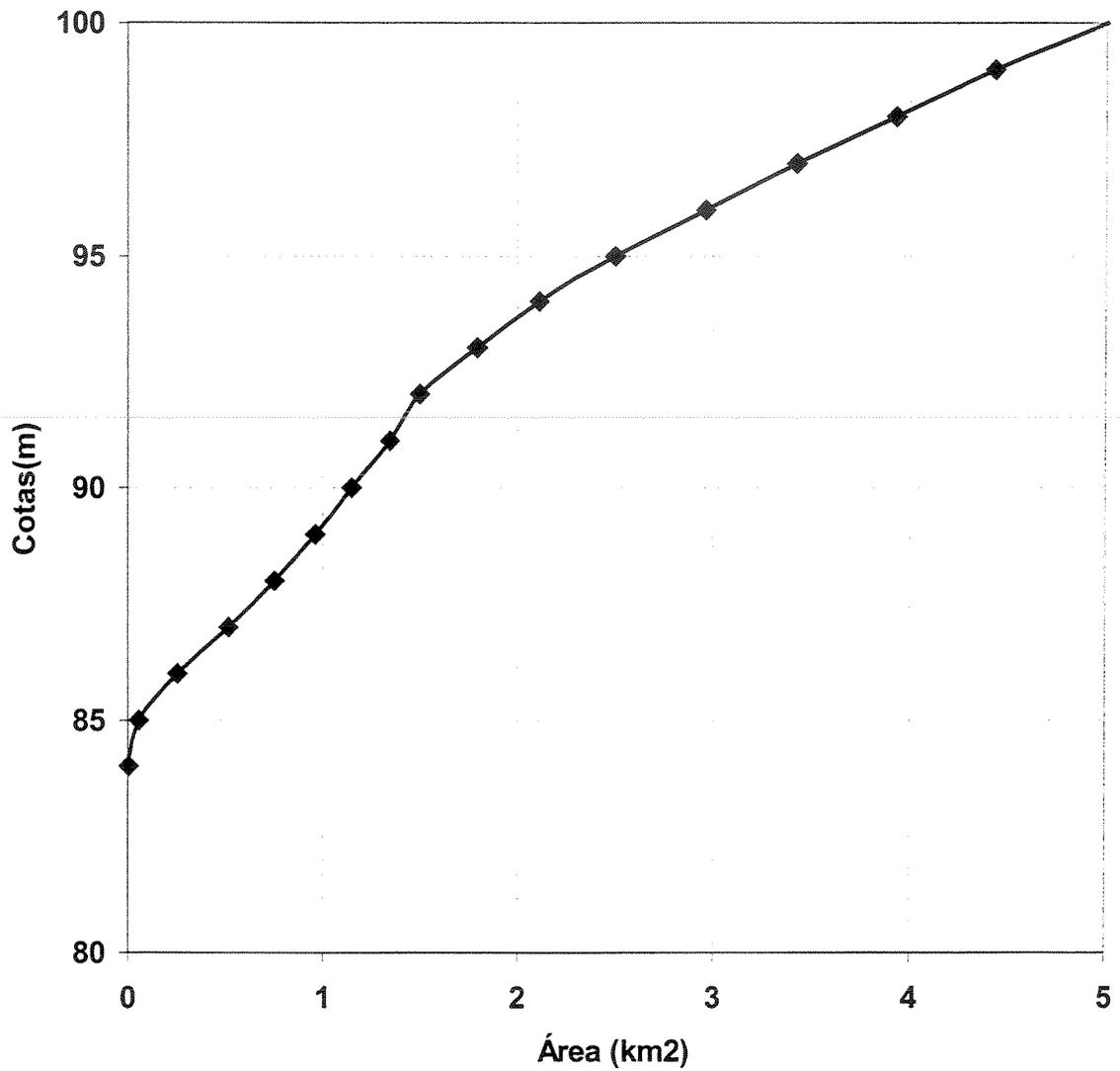


Figura 5.4 - Curva Cota x Área do reservatório Engenheiro Arcoverde.

5.2.1.2 Volume precipitado sobre o reservatório

Os volumes de água precipitados diretamente sobre o reservatório foram calculados através dos produtos entre as precipitações mensais e as áreas dos espelhos d'água do açude. Estas áreas foram obtidas da curva Cota x Área do reservatório Engenheiro Arcoverde (Figura 5.3), fornecida pelo LRMS.

A precipitação sobre o reservatório Engenheiro Arcoverde para o período de 1974 - 1980 foi registrada no posto pluviométrico de Condado. Diante da necessidade de preenchimento das falhas nos registros pluviométricos do posto, utilizou-se o método da Ponderação Regional com base na Regressão Linear Simples e para análise de consistência dos dados pluviométricos utilizou-se o método da Dupla Massa. Foram utilizados os registros pluviométricos dos postos de Malta, Desterro de Malta e Pombal para se fazer a correlação com os dados pluviométricos do posto de Condado. Os dados brutos de pluviometria destes postos foram cedidos pelo LRMS (Laboratório de Meteorologia e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba).

Tabela 5.2 - Precipitação mensal no Posto de Condado (mm) no período de 1974 -1980

Ano/ mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1974	213,1	255,4	266,6	431,2	132,2	33,7	21,9	1,5	9,7	14,5	45,0	30,4
1975	62,1	277,4	285,2	245,5	113,8	28,7	58,2	4,2	0,1	2,0	3,4	23,8
1976	28,6	148,2	235,7	127,4	44,9	7,0	2,9	1,5	8,6	33,9	16,0	14,7
1977	80,7	102,0	207,3	279,0	99,2	31,6	29,7	8,4	3,2	4,5	5,9	47,0
1978	55,5	198,5	140,3	185,1	14,9	86,4	67,3	14	8,8	5,7	17,0	3,5
1979	64,0	138,2	125,7	132,0	66,1	20,7	10,8	5,9	24,9	32,9	36,6	26,9
1980	56,2	219	115,7	46,7	8,4	17,3	7,6	6,1	8,9	13,1	17,6	10,9

5.2.1.3 Volume evaporado do reservatório

Pelo fato de não se ter estação climatológica instalada na região do reservatório Engenheiro Arcoverde, tornou-se necessário o uso de dados de evaporação de outra estação que retratasse bem a região em estudo. Os dados de evaporação utilizados foram os do tanque classe A da estação evaporimétrica de Patos, no período de 1974 – 1980, a qual tem características fisiográficas semelhantes aos da região onde está inserido o reservatório Engenheiro Arcoverde. 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 -Kp) que corrija as evaporações medidas no tanque classe A para representar a evaporação no reservatório. O fator que relaciona a evaporação de um reservatório e do tanque classe A oscila entre 0.6 e 0.8 (TUCCI e BELTRAME, 2000). Para a região semi-árida do Nordeste Brasileiro um valor conservador para este fator de correção do tanque é 0,75.

O volume evaporado do reservatório no mês foi calculado multiplicando-se o valor da evaporação corrigida pela área média do espelho d'água, que foi obtido a partir da curva Cota x Área (Figura 5.4). Os dados de evaporação observados no posto evaporimétrico de Patos estão expressos na Tabela 5.3 abaixo, já aplicado o fator de correção de Kp igual a 0,75.

Tabela 5.3 - Evaporação corrigida (mm) observada em Tanque Classe A na estação de Patos, no período de 1974 – 1980.

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

5.2.1.4 Volume efluente devido as demandas das cidades de Condado, Malta e o Perímetro de Irrigação

As demandas do perímetro de irrigação e das cidades de Condado e Malta foram obtidas através de visita ao local e aos órgãos envolvidos como: CAGEPA e Departamento de Administração do Perímetro de Irrigação. Estas demandas assumem uma média mensal de 36.000 m³ para os dois municípios, e 135.000 m³ para o perímetro irrigado.

5.2.1.5 Volume afluente ao reservatório

Por não existir estação fluviométrica na região do reservatório Engenheiro Arcoverde tornou-se necessário a busca de métodos que estimassem estas vazões. Optou-se no presente estudo pela utilização do modelo chuva - vazão Tank - Model.

5.2.1.5.1 Modelo Tank Model

O modelo matemático de simulação chuva-vazão Tank Model foi proposto por SUGAWARA (1979). Seus parâmetros são relacionados com características físicas da bacia hidrográfica, e foi utilizado para determinação das vazões afluentes ao reservatório Engenheiro Arcoverde e conseqüentemente, o volume afluente. O mesmo já foi utilizado no nordeste do Brasil (GÓIS e SUZUKI, 1987) e apresentou bom desempenho na aproximação dos mecanismos físicos gerais que governam os processos hidrológicos. O princípio fundamental do modelo é bastante simples, o sistema hidrológico é representado por uma sucessão de tanques fictícios alinhados verticalmente (Figura 5.5) representando os diversos extratos do solo (Figura 5.6) com

as respectivas características de retenção e transferência d'água. 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 5.6). O modelo Tank Model pode operar tanto a nível mensal como a nível diário (CUNHA, 1999).

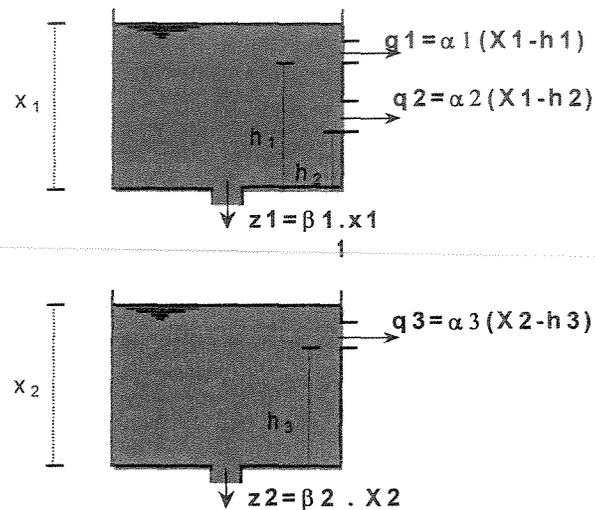


Figura 5.5 - Esquema de representação dos tanques fictícios alinhados verticalmente.

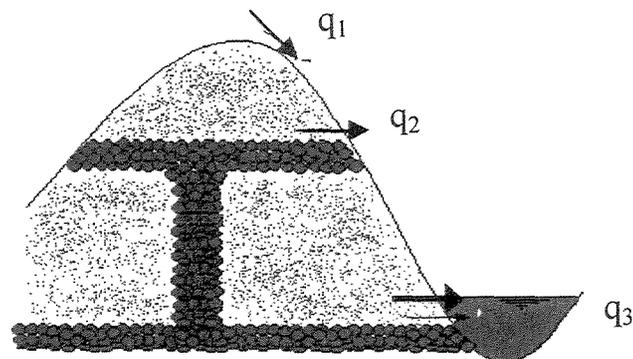


Figura 5.6 - Esquema de representação dos diversos extratos do solo.

A seguir, são mostradas na Tabela 5.4 as lâminas escoadas geradas pelo modelo Tank Model, no período de 1973 a 1991.

Tabela 5.4 - Lâmina escoada gerada pelo modelo Tank Model (mm) no período de 1973 - 1991.

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Anual
1973	10,50	3,90	25,0	100,3	20,7	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	164,8
1974	40,30	49,50	51,9	125,1	22,8	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	0,7	295,6
1975	7,60	54,20	55,9	48,6	19,3	0,3	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	192,6
1976	0,30	26,20	45,2	21,7	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	98,8
1977	11,60	16,20	39,0	54,6	17,2	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	144,4
1978	6,20	37,10	24,5	34,2	24,6	12,8	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	148,1
1979	8,00	24,10	21,4	22,7	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	2,1	0,0	88,0
1980	6,30	41,60	19,2	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	71,3
1981	11,70	0,00	102,9	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,1	119,8
1982	0,00	3,70	12,5	45,6	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,5
1983	1,40	15,80	22,8	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,3
1984	1,30	0,10	36,4	54,6	18,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	110,5
1985	25,80	118,70	49,9	88,1	14,4	19,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,3	329,0
1986	19,30	46,20	65,4	41,1	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	175,7
1987	3,00	15,40	64,8	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	91,2
1988	3,00	15,70	39,3	79,7	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	152,4
1989	3,90	10,60	27,0	117,8	22,0	4,0	8,8	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	211,6
1990	0,00	7,60	0,0	11,8	0,0	4,5	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	10,5	35,8
1991	9,30	16,70	53,1	7,7	14,4	0,0	10,1	0,0	0,0	10,9	1,5	0,0	123,7
Média	8,9	26,5	39,8	46,0	11,0	2,5	1,8	0,1	0,0	0,7	0,5	2,5	140,3

Na Figura 5.7 é mostrado o gráfico da lâmina escoada gerada pelo modelo Tank Model (mm).

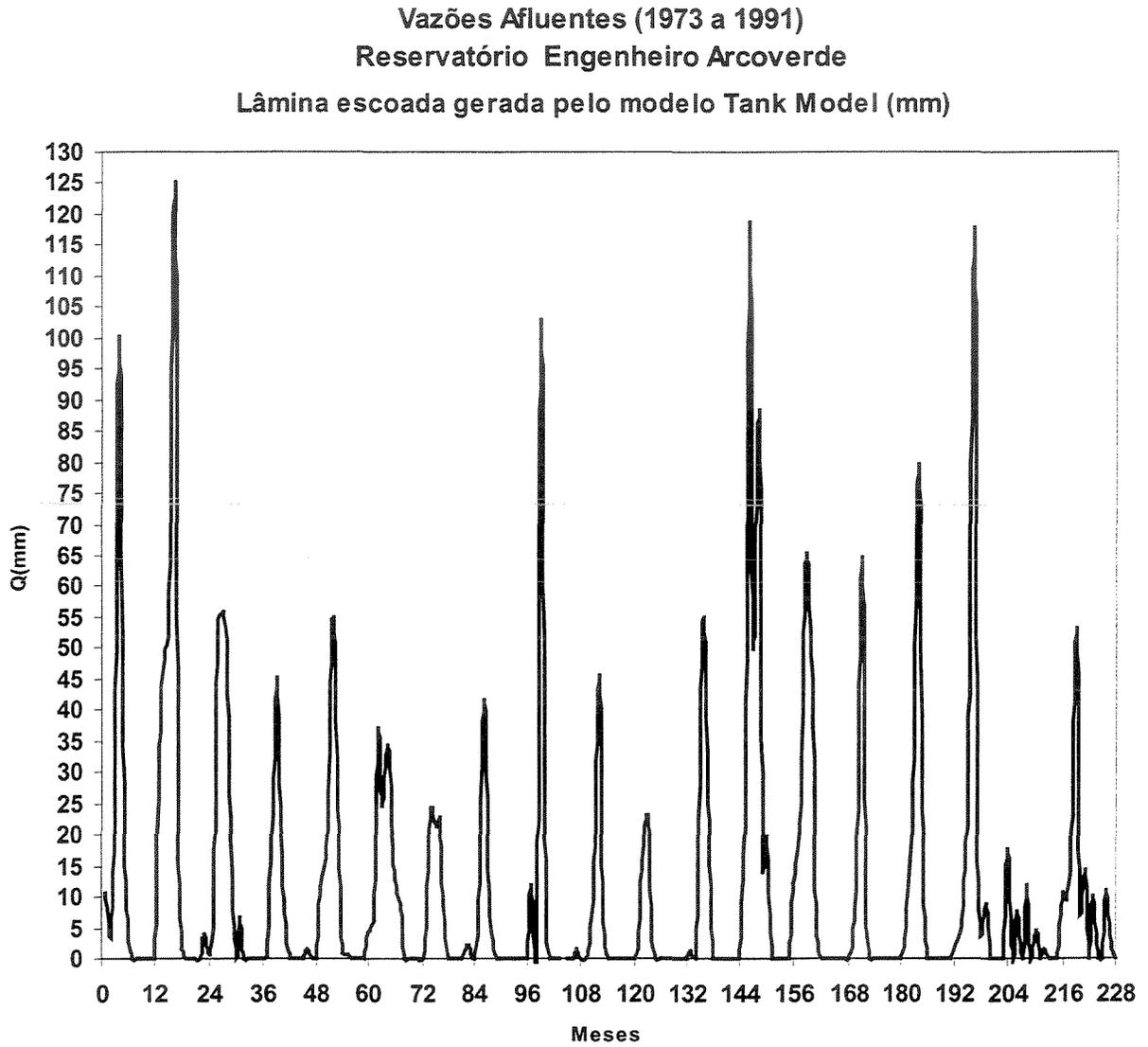


Figura 5.7 - Gráfico da lâmina escoada gerada pelo modelo Tank Model (mm).

5.2.2 Balanço Hídrico das Culturas

Além do estudo do balanço hídrico do reservatório Engenheiro Arcoverde, estudou-se o balanço hídrico das culturas. Este serve para estimar, de forma aproximada, as necessidades de irrigação líquidas (N_{ij}) ao longo do ciclo fenológico da cultura. Para cada intervalo de tempo do ciclo da cultura, a necessidade de irrigação líquida da cultura dependerá da demanda hídrica da cultura ($ET_{m_{ij}}$) e possíveis dotações ou suprimentos naturais de água ao solo, e pode ser determinada pela equação 5.1.

$$N_{ij} = (ET_{m_{ij}} - Pe_j) / N_{irr_i} \quad (5.1)$$

em que:

i : número inteiro representando a cultura ($i=1,2,\dots,n$);

j : número inteiro representando o mês de plantio ($j=1,2,\dots,12$);

N_{ij} : necessidade de irrigação líquida da cultura i no mês j , em mm/mês ou $m^3/ha/mês$;

$ET_{m_{ij}}$: evapotranspiração potencial da cultura i no mês j , em mm/mês ou $m^3/ha/mês$;

Pe_j : precipitação efetiva no mês j , em mm/mês ou $m^3/ha/mês$;

N_{irr_i} : eficiência do sistema de irrigação (80%).

A seguir descreve-se sobre cada uma das variáveis da equação do balanço hídrico das culturas e como foram obtidas.

5.2.2.1 Evapotranspiração da cultura

O consumo de água do conjunto solo-planta, conhecido também como uso consuntivo da planta corresponde à quantidade de água que passa à atmosfera em forma de vapor, pela evaporação do solo e transpiração das plantas, mais a quantidade

5.2.2 Balanço Hídrico das Culturas

Além do estudo do balanço hídrico do reservatório Engenheiro Arcoverde, estudou-se o balanço hídrico das culturas. Este serve para estimar, de forma aproximada, as necessidades de irrigação líquidas (Nl_{ij}) ao longo do ciclo fenológico da cultura. Para cada intervalo de tempo do ciclo da cultura, a necessidade de irrigação líquida da cultura dependerá da demanda hídrica da cultura (ETm_{ij}) e possíveis dotações ou suprimentos naturais de água ao solo, e pode ser determinada pela equação 5.1.

$$Nl_{ij} = (ETm_{ij} - Pe_j) / Nirr_i \quad (5.1)$$

em que:

i : número inteiro representando a cultura ($i=1,2,\dots,n$);

j : número inteiro representando o mês de plantio ($j=1,2,\dots,12$);

Nl_{ij} : necessidade de irrigação líquida da cultura i no mês j , em mm/mês ou $m^3/ha/mês$;

ETm_{ij} : evapotranspiração potencial da cultura i no mês j , em mm/mês ou $m^3/ha/mês$;

Pe_j : precipitação efetiva no mês j , em mm/mês ou $m^3/ha/mês$;

$Nirr_i$: eficiência do sistema de irrigação (80%).

A seguir descreve-se sobre cada uma das variáveis da equação do balanço hídrico das culturas e como foram obtidas.

5.2.2.1 Evapotranspiração da cultura

O consumo de água do conjunto solo-planta, conhecido também como uso consuntivo da planta corresponde à quantidade de água que passa à atmosfera em forma de vapor, pela evaporação do solo e transpiração das plantas, mais a quantidade

de água que é incorporada à massa vegetal. Essa quantidade que é retida pela planta, que se denomina *água de constituição*, é muito pequena com relação à água evaporada e transpirada, e por isto se considera que a necessidade de água da planta ou do conjunto solo-planta é igual à água que é transferida para a atmosfera pela evaporação do solo e transpiração das plantas. O conjunto dos dois fenômenos (evaporação mais transpiração) é denominado *evapotranspiração da cultura*.

Existem três formas ou conceitos de evapotranspiração da cultura, geralmente empregados, que são:

- **Evapotranspiração real ou atual (ET_r)**: quantidade de água realmente consumida por uma cultura determinada (conjunto solo-planta) em um intervalo de tempo considerado. A taxa de evapotranspiração real da cultura depende, dentre outros fatores, do conteúdo de umidade efetivamente existente no solo.

- **Evapotranspiração máxima ($ET_{m_{ij}}$)**: quantidade de água consumida, em um determinado intervalo de tempo, pela cultura em plena atividade vegetativa, livre de enfermidades, em um solo cujo conteúdo de água se encontra próximo à capacidade de campo (limite superior da quantidade de água no solo disponível para a alimentação das plantas). A ($ET_{m_{ij}}$) é maior ou igual do que a evapotranspiração real.

- **Evapotranspiração potencial da cultura de referência (ET_o)**: é a taxa de evapotranspiração de uma superfície de vegetação rasteira verde uniforme, de crescimento ativo, de 8 a 15 cm de altura, que sombreia totalmente o terreno cultivado, em um solo dotado de suficiente quantidade de água.

A evapotranspiração da cultura ($ET_{m_{ij}}$) foi calculada mensalmente, a partir da expressão (DOORENBOS & KASSAN, 1994), que é mostrada na equação 5.2.

$$ET_{m_{ij}} = Kc_i * ET_o \quad (5.2)$$

em que:

Kc_i : coeficiente de cultivo da cultura i;

ET_{O_j} : evapotranspiração de referência no mês j, em mm/mês ou $m^3/ha/mês$.

A evaporação medida no tanque evaporimétrico (ET_{r_j}) classe A instalado na região normalmente em milímetros por dia se relaciona com a evapotranspiração da cultura de referência mediante a expressão 5.3, mostrada abaixo.

$$ET_{O_j} = ET_{r_j} * K_p \quad (5.3)$$

em que:

ET_{r_j} : é a evaporação no tanque classe A no mês j, em mm/mês;

K_p : coeficiente do tanque (igual a 0,75).

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 (com grama batatais). Este estudo foi abordado por DOORENBOS & KASSAN (1979) que expressa o coeficiente do tanque classe A para diferentes coberturas de terreno, diferentes níveis de umidade relativa média do ar e velocidade total do vento em um período de 24 horas. Para o perímetro em estudo o valor de 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.

5.2.2.2 Coeficiente de Cultivo

Em geral, durante o ciclo fenológico, a planta aumenta seu consumo de forma progressiva, até a floração e frutificação, quando começa a diminuir, e logo se estabiliza. O coeficiente de cultivo (Kc), para cada tipo de cultura, assume valores distintos segundo a fase de crescimento da cultura, tendo a necessidade de analisar a

sensibilidade de cada coeficiente para cada cultura. Em geral cada tipo de cultura assume 4 valores de Kc que correspondem aproximadamente aos seguintes períodos de desenvolvimentos das plantas:

Período 1: desde o momento da sementeira até o ponto em que a cultura alcança aproximadamente 15% do seu desenvolvimento;

Período 2: fase que se inicia no final do período 1 e termina imediatamente antes da floração;

Período 3: fase de floração e frutificação;

Período 4: fase de maturação, compreendida entre o final do período 3 e a colheita (final do ciclo).

Os valores de Kc adotados para o balanço hídrico das culturas foram extraídos de (DOORENBOS & KASSAN, 1994). A seguir, na Tabela 5.5, são mostrados os coeficientes de cultivo para cada cultura e seu respectivo período.

Tabela 5.5 - Coeficientes de cultivo de cada cultura por período.

Cultura	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
Cebola	0,50	0,75	1,00	0,85
Pimentão	0,35	0,70	1,00	0,90
Tomate	0,45	0,75	1,15	0,85
Feijão	0,35	0,70	1,00	0,90
Milho	0,40	0,80	1,15	1,10
Algodão	0,45	0,75	1,15	0,85
Banana	0,50	0,85	1,05	1,00
Arroz	1,10	1,25	1,20	1,00

5.2.2.3 Precipitação Efetiva

A precipitação efetiva é sob o ponto de vista agrônômico, a fração de chuva que efetivamente permanece à disposição das raízes das plantas, já que uma parte dela escoar sobre a superfície do terreno e outra parte se perde por percolação. Para estimativa da precipitação efetiva foi considerada a abordagem proposta pela FAO (1988), para terrenos com declividade em torno de 5%, que especificam as equações 5.4 e 5.5.

$$Pe_j = 0.8 * P_j - 25 \text{ se } P_j \geq 75 \text{ mm ou} \quad (5.4)$$

$$Pe_j = 0.6 * P_j - 10 \text{ se } P_j < 75 \text{ mm.} \quad (5.5)$$

em que:

P_j : precipitação média em mm observada na região em cada um dos períodos para o qual foi calculado o balanço hídrico das culturas.

6 O MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR DETERMINÍSTICO

Neste capítulo, aborda-se a metodologia proposta de estudo, com a formulação do modelo de otimização, assim como, os enfoques do problema.

6.1 Generalidades

O modelo de otimização utilizado neste estudo tem como objetivo, maximizar a receita líquida gerada por um perímetro irrigado, que é alimentado por um reservatório de regime plurianual, utilizando-se das técnicas da programação linear. O modelo simula a operação do reservatório através da equação do balanço hídrico do mesmo usando demandas fixas e variáveis, sendo estas obtidas com base no balanço hídrico das culturas selecionadas, estabelecendo a necessidade suplementar líquida de irrigação para cada cultura. O processo de otimização proposto, procurou determinar a extensão das áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura e a vazão aduzida do reservatório para irrigação, sendo que, com uma formulação apropriada, permitiu, ainda, a determinação da lâmina de rega a ser aplicada para cada tipo de cultura via a utilização de um método de programação linear de forma determinística.

Utilizou-se como ambiente computacional para implementar o modelo a ferramenta MATLAB (Matriz Laboratory) que possui rotinas de otimização previamente implementados. Esta ferramenta foi criada pelas Universidades Norte Americanas de Novo México e de Stanford no início da década de 1970 cuja característica principal é

resolver problemas de 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.

6.2 Enfoque do Problema

A concepção metodológica adotada foi a utilização conjunta de modelos de otimização linear e de simulação para solução do problema.

O enfoque adotado foi que a área irrigada seja variável e a lâmina de água fixa, possibilitando a utilização de maior área quanto maior for a disponibilidade de água e, no sentido oposto, a diminuição da área cultivada nos períodos secos.

O problema trata da situação teórica em que o futuro é suposto conhecido, na qual os eventos hidrológicos são os que foram observados no passado. A análise da solução do problema determinou formas para as regras de operação que serão implementadas no perímetro de irrigação, visando a racionalização do uso da água.

As seguintes condições foram usadas na formulação do problema:

- 1) o intervalo temporal de operação do sistema que reflete adequadamente a variabilidade das demandas e das disponibilidades hídricas é o mensal;
- 2) as séries de variáveis hidrológicas e hidroeconômicas (vazões, demandas hídricas, etc.) são consideradas conhecidas;
- 3) a taxa de infiltração foi considerada como 30% da evaporação, no balanço hídrico do reservatório;
- 4) o reservatório encontra-se construído e o perímetro de irrigação acha-se implantado;
- 5) as culturas selecionadas foram escolhidas de acordo com a situação vigente da região.

6.3 Necessidade de Água das Culturas

A necessidade mensal de irrigação líquida das culturas (NI_{ij}) foi determinada a partir das expressões extraídas de DOORENBOS & KASSAM (1994), mostradas no capítulo 5, do posto evapormétrico de Patos e dos postos pluviométricos de Condado. Foram extraídas do *Manual de Orçamentos Agropecuários do Estado da Paraíba, 1997*, os rendimentos (Y_i), preços (PMU_i) e custos (CP_i) das culturas estudadas, mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Produtividade, preços e custos de cada cultura.

	Cebola	Pimentão	Tomate	Feijão	Milho	Algodão	Banana	Arroz
Y_i	45.000	15.000	40.000	1.500	6.000	3.000	45.000	5.000
PMU_i	0,20	0,15	0,25	0,95	0,30	0,57	0,18	0,35
CP_i	1.530	889	1.645	700	680	1.000	1.200	765

Fonte: MARINHO et al. Relatório de Iniciação Científica (1997/1998).

em que:

Y_i : produtividade obtida da cultura i , em kg/ha;

PMU_i : preço unitário do produto da cultura i , em R\$/kg;

CP_i : custo de produção da cultura i , em R\$/ha.

6.4 Formulação do Modelo

A função objetivo do modelo é especificada como a maximização da receita líquida sujeita as restrições de disponibilidade de água, área irrigada e mercado. A receita líquida é a diferença entre a renda bruta total obtida com a venda das produções das culturas e os custos totais de produção que envolvem custos da água, sementes, herbicidas, trabalho mecânico, mão de obra e atualização monetária.

Foram atendidas as restrições de área, disponibilidade do recurso água, mercado consumidor, rotatividade de culturas e arrendamento da terra. Como função objetivo procurou-se maximizar a receita líquida do projeto.

A equação 6.1 representa a maximização da receita líquida.

$$MAX RL = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^n (RB_i - CT_i) \cdot X_{ik} \quad (6.1)$$

em que:

k : período de plantio da cultura (k=1,2 indicam 1^o e 2^o semestres);

RL : função objetivo que define a maximização da receita líquida anual em R\$;

X_{ik} : área cultivada com a cultura i no período de plantio k em ha;

CT_i : custo total da cultura i em R\$/ha;

RB_i : renda bruta gerada com a cultura i em R\$/ha.

A receita líquida (RL_i) foi obtida a partir das equações de 6.2 a 6.5:

$$CA_{ij} = Nl_{ij} \cdot PMA \quad (6.2)$$

$$CT_i = \sum_{j=1}^{12} CA_{ij} + CP_i \quad (6.3)$$

$$RB_i = Y_i \cdot PMU_i \quad (6.4)$$

$$RL_i = RB_i - CT_i \quad (6.5)$$

em que:

PMA: preço médio da água (R\$ 0,13/mm.ha);

CA_{ij}: custo da água para irrigar a cultura i no mês j, em R\$/ha;

RL_i: renda líquida gerada com a cultura i em R\$/ha .

Na construção dos custos foi assumido que o produtor é dono da terra, assim o custo da terra não é incluído. Os custos indiretos (administração, impostos, taxas, etc...) também não são incluídos, pois não são relevantes no processo de escolha das alternativas de produção. Os custos de produção foram obtidos utilizando o preço de compra e/ou contratação de serviços. Os preços dos produtos correspondem ao preço no momento da colheita. O fato de escolher a lâmina máxima não significa a obtenção dos requerimentos economicamente mais eficientes quando se considera um conjunto de áreas de diferentes tamanhos e diferentes culturas.

São restrições do modelo de otimização:

a) o balanço hídrico do reservatório que representa as variações de seus armazenamentos mensais, é representado na equação 6.6:

$$VR_{j+1} = VR_j + QA_j - QD_j + VP_j - VEV_j - VINJ_j - DEM_j \quad (6.6)$$

em que:

VR_j: volume armazenado no reservatório no final do mês j, em m³;

QA_j: volume afluente ao reservatório durante o mês j, em m³;

QD_j: volume efluente do reservatório durante o mês j, em m³;

VP_j: volume precipitado no reservatório durante o mês j, em m³;

VEV_j: volume evaporado do reservatório durante o mês j, em m³;

$VINF_j$: volume infiltrado do reservatório durante o mês j, em m³; e,

DEM_j : demanda de água para irrigação durante o mês j, em m³;

A análise do balanço hídrico do reservatório teve início no final do mês de dezembro com o volume inicial igual a 18.000.000 m³. Este valor foi obtido através da média anual dos volumes observados do reservatório para o período de 1974 a 1980, período de plena atividade do perímetro e do reservatório.

b) disponibilidade total de área para plantação representada pela equação 6.7:

$$\sum_{i=1}^n X_{ik} \leq As_k, \text{ para } k = 1, 2 \quad (6.7)$$

em que:

As_k : área total disponível no semestre k (k= 1,2), em ha;

c) a produção das diferentes culturas é representada por várias restrições, ou seja, por condições de mercado, consumo interno, capacidade de processamento e problemas regionais. As áreas de cultivo tiveram restrições de valores máximos e mínimos, além do calendário de plantação mensal das culturas;

A seqüência mensal destas plantações é mostrada na Tabela 6.2. Para o desenvolvimento dos modelos, admiti-se as áreas máximas e mínimas e os preços de venda no mercado para cada produto, conforme os dados apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.2 - Plantação mensal das culturas.

Culturas	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Cebola			X	X	X	X						
Pimentão			X	X	X	X						
Tomate			X	X	X	X						
Feijão (safra)			X	X	X	X						
Feijão (entres)								X	X	X	X	
Milho (safra)			X	X	X	X						
Milho (entres)								X	X	X	X	
Algodão								X	X	X	X	
Banana	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Arroz			X	X	X	X						

Tabela 6.3 - Áreas máximas e mínimas das culturas e o preço de venda.

Culturas	Área máxima (ha)	Área mínima (ha)	Preço de venda (R\$/kg)
Cebola	45	30	0,20
Pimentão	45	25	0,15
Tomate	40	25	0,25
Feijão (safra)	60	35	0,70
Feijão (entresafra)	50	20	0,95
Milho (safra)	60	35	0,20
Milho (entresafra)	50	20	0,30
Algodão	60	35	0,57
Banana	65	30	0,18
Arroz	40	20	0,35

d) disponibilidade de água representada pelas equações 6.8 e 6.9:

$$\sum_{i=1}^n NI_{ij} \cdot X_{ik} \leq W_{T \max j}, \text{ para } k = 1, 2 \quad (6.8)$$

$$\sum_{i=1}^n NI_{ij} \cdot X_{ik} \geq W_{T \min j}, \text{ para } k = 1, 2 \quad (6.9)$$

em que:

$W_{T \min j}$: volume mensal mínimo de água disponível, em mm.ha;

$W_{T \max j}$: volume mensal máximo de água disponível, em mm.ha.

As restrições de disponibilidade de água representam a soma de todos os requerimentos brutos de água das culturas que podem ser menores ou iguais a disponibilidade mensal total de água ($W_{T \max j}$). Para garantir a sustentabilidade hídrica do reservatório e o controle da estiagem foram estimados níveis de volumes do reservatório para que não sejam ultrapassados e nem fiquem escassos para uma determinada época do ano. Estes níveis foram de 35.000.000 m³ e 8.000.000 m³, respectivamente. Ou seja, os volumes não podem ultrapassar e nem ficar abaixo dos estabelecidos, isto tudo com o pensamento no futuro, e;

e) não negatividade das variáveis representada pela equação 6.10:

$$X_{ik} \geq 0 \quad (6.10)$$

6.5 Análises Comparativas

Foram desenvolvidos dois modelos de programação linear determinístico para a análise comparativa sensibilidade das áreas de cultivo das culturas, e analisou-se quatro modelos para os volumes observados ao reservatório Engenheiro Arcoverde. Com isso, pode-se verificar qual o cenário que proporciona os melhores retornos econômicos.

6.5.1 Análise comparativa da área de cultivo

Analizou-se o comportamento dos modelos para diferentes cenários hidroagrícolas. Ou seja, foram criados vários cenários para as áreas de cultivo, para observar qual o melhor cenário que representa a situação vigente da região e a que obtém maior receita líquida.

No primeiro modelo de otimização foram analisadas as áreas de cultivo com restrições de valores máximos e mínimos para cada cultura.

No segundo modelo de otimização foram analisadas as áreas de cultivo com restrições de valores entre a área máxima do perímetro (230 ha) e os valores mínimos de cada cultura.

6.5.2 Análise comparativa do volume observado

Foram analisadas as médias anuais dos volumes observados do reservatório ao final de cada mês que correspondem aos anos de maiores cheias e maiores estiagens. E ainda, analisou-se o cenário mais seco e o de maior cheia.

O modelo de otimização foi analisado para as seguintes médias:

- *série 01* corresponde aos anos de 1974 a 1978, que é o intervalo analisado para maiores cheias do reservatório;
- *série 02* corresponde aos anos de 1979 a 1983, que é o intervalo analisado para as maiores estiagens do reservatório;
- *série 03* corresponde ao ano de 1975, que é o ano de maior cheia, e;
- *série 04* corresponde ao ano de 1983, que é o ano de maior estiagem.

A seguir são mostradas na Tabela 6.4 os valores de cada série histórica.

Tabela 6.4 – Séries históricas dos volumes afluentes médios observados anualmente, em m³

Mês/Série	Série 01	Série 02	Série 03	Série 04
jan	19.486.434	7.386.280	25.829.952	2.266.805
fev	22.633.206	7.659.340	29.909.185	2.255.505
mar	25.992.409	9.631.639	34.837.430	2.172.902
abr	28.603.382	10.666.110	34.549.677	2.052.161
mai	30.457.712	9.941.483	34.252.333	1.915.369
jun	29.883.759	9.205.020	33.964.580	1.720.939
jul	28.778.686	8.350.473	33.101.730	1.542.711
ago	27.256.775	7.436.708	31.764.312	1.323.978
set	25.544.788	6.618.804	30.340.610	1.117.150
out	23.893.658	5.784.315	28.442.340	939.830
nov	22.325.373	5.098.427	26.802.925	768.230
dez	21.035.585	4.395.063	25.413.377	507.868

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos cálculos da evapotranspiração potencial das culturas mensalmente, são mostradas na Tabela 7.1 abaixo. Estes resultados foram obtidos através dos cálculos provenientes das equações 5.2 e 5.3.

Tabela 7.1 - Cálculo da evapotranspiração potencial das culturas.

Evapotranspiração potencial das culturas (ETm), em mm								
	Cebola	Pimentão	Tomate	Feijão	Milho	Algodão	Banana	Arroz
jan	75,4	60,30	67,84	52,76	60,30	67,84	75,38	165,83
fev	85,50	79,80	85,50	79,80	91,20	85,50	96,90	142,50
mar	81,56	76,13	81,56	76,13	87,00	81,56	92,44	135,94
abr	97,50	97,50	112,13	97,50	112,13	112,13	102,38	117,00
mai	100,50	100,50	115,58	100,50	115,58	115,58	105,53	120,60
jun	88,61	93,83	88,61	93,83	114,68	88,61	104,25	104,25
jul	61,50	49,20	104,55	43,05	49,20	55,35	61,50	135,30
ago	112,50	105,00	67,50	105,00	120,00	112,50	127,50	187,50
set	124,31	116,03	124,31	116,03	132,60	124,31	140,89	207,19
out	178,50	178,50	205,28	178,50	205,28	205,28	187,43	214,20
nov	177,00	177,00	203,55	177,00	203,55	203,55	185,85	212,40
dez	156,19	165,38	156,19	165,38	202,13	156,19	183,75	183,75

A seguir, é mostrada na Tabela 7.2 os resultados do cálculo da necessidade de irrigação líquida das culturas, proveniente das equações de 5.1 à 5.5 descritos no capítulo anterior.

Tabela 7.2 - Cálculo da necessidade de irrigação líquida das culturas.

Necessidade de irrigação líquida das culturas (NI_{ij}), em mm.								
	Cebola	Pimentão	Tomate	Feijão	Milho	Algodão	Banana	Arroz
jan	35,47	16,63	26,05	7,20	16,63	26,05	35,47	148,53
fev	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,38
mar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
mai	57,88	57,88	76,72	57,88	76,72	76,72	64,16	83,00
jun	97,77	104,28	97,77	104,28	130,34	97,77	117,31	117,31
jul	68,38	53,00	122,19	45,31	53,00	60,69	68,38	160,63
ago	140,63	131,25	84,38	131,25	150,00	140,63	159,38	234,38
set	155,39	145,03	155,39	145,03	165,75	155,39	176,11	258,98
out	223,13	223,13	256,59	223,13	256,59	256,59	234,28	267,75
nov	221,25	221,25	254,44	221,25	254,44	254,44	232,31	265,50
dez	185,23	196,72	185,23	196,72	242,66	185,23	219,69	219,69

As lâminas de água líquidas necessárias para a irrigação foram calculadas acumulativamente seguindo o calendário das culturas, e os valores que se encontram com 0,0 (zero) significam que naquele mês não será necessário irrigar, ou seja, não haverá necessidade de usar água do reservatório para a irrigação das culturas alocadas no perímetro.

Observa-se na Tabela 7.2 que as lâminas de água calculadas mensalmente para cada cultura, apresentam uma alternância de valores conforme o decorrer dos meses. Vemos que nos meses de fevereiro a maio as culturas não precisam ser irrigadas com água do reservatório, e que as culturas que requerem uma maior quantidade de água, como arroz e banana, apresentam um aumento significativo da lâmina de água no decorrer destes meses.

A seguir, é mostrada na Tabela 7.3 os resultados do cálculo da renda líquida das culturas.

Tabela 7.3 - Cálculo da renda líquida (RL_i) das culturas, em R\$/ha.

	Cebola	Pimentão	Tomate	FeijãoS	FeijãoE	MilhoS	MilhoE	Algodão	Banana	Arroz
N_{ij}	223,1	223,1	256,6	223,1	223,1	256,6	256,6	256,6	234,3	267,8
CA_{ij}	29,0	29,0	33,4	29,0	29,0	33,4	33,4	33,4	30,5	34,8
CT_i	1559,0	918,0	1678,4	729,0	729,0	713,4	713,4	1033,4	1230,5	799,8
RB_i	9000	2250	10000	1050	1425	1200	1800	1710	8100	1750
RL_i	7441,0	1332,0	8321,6	321,0	696,0	486,6	1086,6	676,6	6869,5	950,2

em que:

N_{ij} : necessidade de irrigação líquida da cultura i no mês j , em mm/mês;

CA_{ij} : custo da água para irrigar a cultura i no mês j , em R\$/ha;

CT_i : custo total da cultura i em R\$/ha;

RB_i : renda bruta gerada com a cultura i em R\$/ha.

RL_i : renda líquida gerada com a cultura i em R\$/ha .

FeijãoS: feijão cultivado na safra;

FeijãoE: feijão cultivado na entresafra;

MilhoS: milho cultivado na safra;

MilhoE: milho cultivado na entresafra.

Os resultados apresentados na Tabela 7.3 foram provenientes das expressões 6.2 à 6.5. A produtividade das culturas foram estimadas fazendo-se uma média entre a produtividade máxima e a mínima de cada cultura.

Observa-se que os valores da receita líquida, que faz parte da função objetivo, é resultado de uma série de cálculos, provenientes de custo de água, custo de produção, produtividade, preço médio das culturas, lâmina de irrigação, renda bruta e custo total das culturas. Ou seja, a função objetivo representada pela receita líquida das culturas, é o coração do modelo.

7.1 Análise Comparativa

A seguir, serão analisados os resultados da análise de sensibilidade da área de cultivo e do volume observado.

7.1.1 Análise comparativa da área de cultivo

Os resultados a seguir, foram oriundos da análise da sensibilidade das áreas de cultivo com restrições de valores máximos e mínimos para cada cultura. Os resultados da aplicação do primeiro modelo de otimização são apresentados na Tabela 7.4.

Como fonte de comparação foi desenvolvido o segundo modelo de otimização, desta vez, as áreas de cultivo tiveram restrições de valores entre a área máxima do perímetro (230 ha) e os valores mínimos de área de cada cultura. Os resultados da aplicação deste modelo de programação linear determinístico, via a utilização do software MATLAB (1999), são apresentados na Tabela 7.5.

Foi considerado para os dois modelos de otimização que o somatório de áreas das culturas para cada semestre seja igual ou menor do que 230 ha.

Tabela 7.4 - Resultados do modelo linear determinístico I.

MODELO LINEAR DETERMINÍSTICO I			
Culturas	Área Cultivada (ha)	Consumo D'água (m³)	Receita Líquida (R\$)
Cebola	30	66.939,0	223.229,8
Pimentão	25	55.782,5	33.299,8
Tomate	40	102.636,0	332.865,7
Feijão (safra)	35	78.095,5	11.234,8
Feijão (entresafra)	65	145.034,5	45.239,6
Milho (safra)	35	89.806,5	17.032,5
Milho (entresafra)	65	166.783,5	70.631,8
Algodão	65	166.783,5	43.981,8
Banana	35	81.998,0	240.434,0
Arroz	30	80.325,0	28.505,8
I semestre	230	387.680,5	886.602,4
II semestre	230	560.599,5	400.287,2
Total anual	460	948.280,0	1.286.889,6

Tabela 7.5 - Resultados do modelo linear determinístico II.

MODELO LINEAR DETERMINÍSTICO II			
Culturas	Área Cultivada (ha)	Consumo D'água (m³)	Receita Líquida (R\$)
Cebola	30	66.939,0	223.229,8
Pimentão	25	55.782,5	33.299,8
Tomate	40	102.636,0	332.865,7
Feijão (safra)	35	78.095,5	11.234,8
Feijão (entresafra)	30	66.939,0	20.879,8
Milho (safra)	35	89.806,5	17.032,5
Milho (entresafra)	130	333.567,0	141.263,6
Algodão	35	89.806,5	23.682,5
Banana	35	81.998,0	240.434,0
Arroz	30	80.325,0	28.505,8
I semestre	230	397.162,0	881.779,2
II semestre	230	572.310,5	426.260,0
Total anual	460	969.472,5	1.308.039,1

Observa-se nas Tabelas 7.4 e 7.5 que os resultados obtidos estão dentro das limitações impostas pelas restrições. O primeiro modelo de otimização apresentou um consumo de água anual de 948.280,0 m³ e uma receita líquida total de R\$ 1.286.889,6 e no segundo modelo um consumo de água anual de 969.472,5 m³ e uma receita líquida total de R\$ 1.308.039,1. Nota-se que o segundo modelo possui uma receita líquida maior do que o primeiro, mas possui também um consumo de água maior, o que torna inviável sua utilização, e foge do objetivo principal do trabalho, que é otimizar o uso da água. O primeiro modelo de otimização também foi escolhido em relação ao segundo devido ter uma racionalização de 2,18% de água e lucros de 1,61% na receita líquida, ou seja, tem-se maiores benefícios economizando água.

O primeiro modelo de otimização apresentou o maior consumo de água para as culturas de milho na época da entressafra (agosto à novembro) e para o algodão, $166.783,5 m^3$, e a cultura que apresentou a maior receita líquida foi a cultura de tomate, R\$ 332.865,7. Nota-se que toda a área disponível (230 ha) foi utilizada para cada semestre e para cada modelo de otimização. E indicou que a água disponível foi suficiente. Isto é de grande valia, pois todas as restrições foram atendidas e os resultados foram ótimos para a execução do perímetro de irrigação.

O segundo modelo tornou-se menos adequado para a implantação no perímetro de irrigação, devido a grande área de cultivo que foi atribuída para a cultura de milho na época da entressafra (agosto à novembro). Pelo elevado consumo de água e da baixa receita líquida, na entressafra, é de difícil aceitabilidade pelos produtores cultivar esta quantidade de área, pois existe dificuldade na sua comercialização. Sendo melhor plantar diversas culturas tendo um retorno considerável com um mínimo consumo de água. Assim, obtem-se uma racionalização do uso da água do reservatório e com maiores benefícios na receita líquida.

Os dados obtidos no consumo de água anual das culturas, no processo de otimização, para o volume mensal de água no reservatório considerando-se os valores do balanço hídrico do reservatório e das culturas no primeiro e no segundo modelo estão dentro das limitações estabelecidas.

Considerando-se que o processo adota como volume inicial para o mês de dezembro $18.000.000 m^3$, verifica-se que o volume do reservatório no mês de dezembro, ao final do primeiro ano de estabilização do projeto de irrigação, permanece inalterado garantindo, portanto, a sustentabilidade hídrica do mesmo. Além disso, pode-se verificar que os volumes mensais não ultrapassam o valor da capacidade máxima do reservatório, que é de $35.000.000 m^3$, e o limite mínimo estabelecido no programa que é de $8.000.000 m^3$, para dar suporte a um eventual período de estiagem.

A seguir faz-se uma breve comparação com o perímetro já existente em atividade, onde arrenda-se a mesma área do modelo de otimização, porém com diferentes culturas, e com os dados fornecidos pela atual administração do perímetro de irrigação do município de Condado - PB, cujo responsável é o engenheiro Hermes Ribeiro Neto, CPF 207.645.884-00.

O volume de água captado do ano de 1997 do reservatório Engenheiro Arcoverde para alimentação do perímetro irrigado, com as mesmas dimensões do modelo estudado, foi de $1.186.806,0 m^3$ e comparando com o volume de água anual obtido através do primeiro modelo de otimização, que foi de $948.280,0 m^3$, houve uma redução de $238.526,0 m^3$, que significa 25,15% do total captado pelo reservatório.

Analisando a receita líquida anual do perímetro instalado que é R\$ 771.588,3, e comparando com a receita líquida anual obtida pelo primeiro modelo de otimização, R\$ 1.286.889,6, obteve-se um acréscimo de R\$ 515.301,3, que significa um aumento de 34,0% em relação a receita anual do perímetro atualmente instalado. O que traria maiores lucros para os produtores da região.

Observa-se que o modelo de otimização I apresenta melhores resultados, caso ali fosse implantada as soluções fornecidas pelo modelo.

7.1.2 Análise comparativa do volume observado

Foram analisadas as médias anuais dos volumes observados do reservatório ao final de cada mês que correspondem aos anos de maiores cheias e maiores estiagens. E ainda, foi analisado o cenário mais seco e o de maior cheia. Foram analisadas quatro séries históricas, como foi descrito no capítulo 6.

Nesta análise de sensibilidade, foram elaborados 04 (quatro) modelos de otimização que representam as séries correspondentes aos vários cenários.

Observou-se o comportamento das variáveis, assim como as mudanças dos limites especificados nas restrições para cada cenário, sem que ocorra alteração na solução ótima encontrada originalmente. Observou-se que o aumento ou a diminuição da disponibilidade de água, dentro dos limites propostos, não teve influência nas variáveis básicas dos modelos.

O modelo de programação linear determinístico desenvolvido para procurar a solução ótima de uma função objetivo para um único reservatório de regime plurianual, com diversas restrições, obteve uma solução ótima dentro dos limites estabelecidos, que é a solução apresentada no modelo de programação linear determinístico I.

CONCLUSÕES

O modelo de otimização matemática desenvolvido para maximizar a receita líquida de uma área de agricultura irrigada, permitiu a obtenção de uma solução ótima para racionalizar o uso da água, além de selecionar os padrões de culturas economicamente viáveis para a região de Condado-PB e a disponibilidade dos recursos hídricos do reservatório Engenheiro Arcoverde, que atua em regime plurianual.

Observa-se que toda a área disponível (230 ha) foi utilizada para cada semestre. Indicou também que a água disponível foi suficiente.

Os dados estão compatíveis com os limites estabelecidos no problema e observa-se que as culturas que propiciam maior retorno líquido tiveram suas áreas maximizadas dentro das limitações de disponibilidade de água.

Observa-se que na análise comparativa da área de cultivo das culturas, o primeiro modelo de otimização desenvolvido para racionalizar o uso da água e obter a maximização da receita líquida, obteve melhores resultados do que o segundo modelo de otimização. E na análise comparativa do volume observado, o aumento ou a diminuição da disponibilidade de água, dentro dos limites propostos, não teve influência nas variáveis básicas do modelo.

Fez-se uma breve comparação com os dados fornecidos pela Administração do Perímetro de Irrigação do município de Condado – PB. O primeiro modelo apresentou uma redução de 25,15% no volume anual de água captado pelo reservatório para

alimentação do perímetro e um acréscimo de 34% na receita líquida anual das culturas em estudo.

Finalmente, com a realização desta pesquisa, observamos a grande viabilidade das técnicas matemáticas de otimização, com destaque para a Programação Linear, na resolução de problemas de recursos hídricos que envolvem aspectos de agricultura irrigada. Deve-se salientar que todas as decisões contidas neste trabalho estão sujeitas à risco.

Deve-se ainda relatar que o problema da seca do Nordeste não é um problema, mas uma característica. Esta característica é que aumentou a vulnerabilidade da sociedade em relação à utilização e aproveitamento dos recursos hídricos.

RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para maior credibilidade dos modelos estudados por este trabalho a suas aplicações, que:

- modelos de otimização utilizem lâminas alternativas de água, pois apresentam uma maior flexibilidade e variabilidade das lâminas de água aplicadas;
- nos modelos de planejamento de áreas irrigadas incorpore-se a função de resposta da cultura à água;
- tenha-se uma pesquisa com maior intensidade nas funções de resposta das culturas à água nos projetos de irrigação;
- tenha-se uma maior uniformização nas determinações dos custos de produção das culturas;
- faça-se um estudo detalhado de mercado, para a introdução de novas culturas nas áreas irrigadas;
- utilize-se a necessidade de lixiviação dos sais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Pesquisa operacional aplicada à agricultura irrigada. 1986. 27f. Campina Grande. **Curso de especialização em irrigação...** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1986. Mimeografado.

ANDRADE FILHO, M. G.; SOARES FILHO, Secundino. Planejamento da Operação de um Sistema Hidrelétrico com Objetivos Conflitantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 6., 1986, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: CBA, 1986.

ATLAS CLIMATOLÓGICO DO ESTADO DA PARAÍBA. 1987. 2ª ed. Campina Grande. UFPB. Núcleo de Meteorologia Aplicada.

AZEVEDO FILHO, A. J. B.V.; NEVES, E.M. Pesquisa operacional na agricultura brasileira. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE MATEMÁTICA APLICADA À COMPUTAÇÃO, 11., 1988. 68f. Botucatu. **Curso ministrado.** Botucatu: SBMAC, 1988. Mimeografado.

BALTRA, C.O. A utilização da informática na irrigação. **ITEM, Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília. N.28. p.13-15, 1982.

BARTH, Flávio Terra, et al. 1987. **Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos** - Coleção ABRH de Recursos Hídricos -Vol. I.-Editora Nobel/ABRH.

* ABNT(Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6023/Agosto 2000.

BELLMAN, R. E. **Dynamic Programming**, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957.

BERGMANN, H. C. J. Lorini. Determinação de Regras Operacionais para um Sistema de Reservatórios de Múltiplos Usos. 1993. 159f. **Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)** - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CHRISTOFIDIS, D. Situação das Áreas Irrigadas, Métodos e Equipamentos de Irrigação-Brasil. In: Anais do Ciclo de Palestras da Secretária 1997-1999. Brasília. **Anais...** Brasília: Ministério do Meio Ambiente - MMA e Secretária de Recursos Hídricos - SRH, 1999. p. 19-41.

CÓDIGO DAS ÁGUAS, 1934 (Artigo 34). Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, Brasília, DF.

CUNHA, R. G. L. Operação Integrada do Reservatório Engenheiro Arcoverde, Poços Amazonas e Perímetro Irrigado de Condado-Pb, Utilizando-se de Programação Linear. 1999. 112f. **Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)** - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

CURI, R. C.; CURI, W. F. Operação Integrada de Reservatório, Poços e Área Irrigada via Programação Linear Recursiva, submetido ao **4º Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Campina Grande, PB. Novembro. 1998.

DANTAS NETO, J. Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água. 1994. 125f. **Tese (Doutorado em Irrigação)** - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

DANTZIG G. B. **Linear Programming Under Uncertainty**, Asmae. Sci., 193/4, 1955.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. 1994. Campina Grande, UFPB, Estudos FAO Irrigação e Drenagem, n.33, 306p. (Tradução de H.R. GHEYI).

DOORENBOS, J. C.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper n. 33.

FAO. **Irrigation Water Needs**. Rome. Paginação irregular. (Irrigation Water Management Training Manual 3). 1988.

FRIZZONE, J. A. **Modelo de Programação Linear Para Otimizar o Uso da Água em Perímetros Irrigados e sua Aplicação no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho**. 1996. 57f. **Tese (livre-docência)** - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

FURTADO, CELSO. **Seca e Poder**. In: OLIVA, J. & GIANANTI, R. **Espaço e modernidade: temas da geografia do Brasil**. São Paulo: Atual, 1999. Inclui Índice. ISBN 85-357-0013-7.

GOIS, R. S.; SUZUKI. **Run-off characteristics of small rivers in northeast Brazil**. Proceedings of the XXXI Congress on Hydraulics, Tokyo, p. 47-52. 1987.

HALL, W. A.; DRACUP, J. A. **Water Resources Systems Engineering**. McGraw-Hill, 1970. 372 p.

HERMANN, R. M. **Modelos de simulação no planejamento de recursos hídricos; notas de aula da EPUSP**. 1970. 27p.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Contagem da População. 1996. Brasília, 1996. Volume I.

KARAMOUZ, MOHAMMAD; MARK H. HOUCK, Annual and Monthly Reservoir Operating Rules Generated by Deterministic Optimization, **Water Resources Research**, Vol. 18, No. 5, October 1982.

LANNA, A. E. 1997. Análise de Sistemas e Engenharia de Recursos Hídricos. In: PORTO, RUBEM LA LAINA. **Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Editora Universidade, UFRGS: ABRH. p.15-25.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. **O Uso da Irrigação no Brasil**. In: ANEEL/MME/MMA-SHR/OMM. **O Estado das Águas no Brasil: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos**. 1. ed. Brasília: ANEEL, SIH; MMA, SHR; MME, 1999. 334 p. Inclui índice. ISBN 85-87491-01-06. Cap. 3.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. **Water Resources Systems Planning and Analysis**. New Jersey, Prentice Hall. 1981. 559p.

MANNOCHI, F.; MECARELLI, P. Optimization analysis of deficit irrigation systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 120, n.3, p. 484-503, 1994.

MARINHO, Manoel H. N., CURI, W. F. e CURI, R. C. Operação de um Reservatório e Área Irrigada Via Programação Linear para Maximização dos Lucros. In: **Relatório de Iniciação Científica**. Outubro/1997 a Setembro/1998. Bolsista CNPq/PIBIC. Processo CNPq: 529437/97-7. Campina Grande, 1998.

MATLAB® 5 Versão do Estudante - Duane Hanselman e Bruce Littlefield. Guia do Usuário, São Paulo: Makron Books, 1999. 456p. Inclui índice. ISBN 85.346.1058-4. 1 CD-ROM.

NEMEC, J. **Hydrological Forecasting**. Water Science and Technology Library, 1986. Holanda.

OLIVA, J. & GIANANTI, R. **Espaço e modernidade: temas da geografia do Brasil**. São Paulo: Atual, 1999. Inclui Índice. ISBN 85-357-0013-7.

OLIVEIRA, J. A.; LANNA, A. E. Otimização de um sistema de múltiplos reservatórios atendendo a múltiplos usos no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.2, n.2, p. 123-141, jul./dez. 1997.

PARAÍBA, GOVERNO DO ESTADO. 1994. **Plano Estadual de Recursos Hídricos-ATECEL/UFPB- Campina Grande-PB**.

PARAÍBA, GOVERNO DO ESTADO. 1995-97. **Hidroinforme - Boletim de Monitoramento de Açudes da Paraíba-LRMS/PB-Volumes I, II, III**.

PARAÍBA, GOVERNO DO ESTADO. 1997. **Manual de Orçamentos Agropecuários**, CENOP-CDE-COVAT/Banco do Nordeste, Campina Grande, PB.

PEREIRA MENDES, A. R. Programação matemática aplicada a otimização de padrões de culturas irrigadas. 1996. 72f. **Dissertação (Mestrado em Irrigação)** – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

PROJETO ENGENHEIRO ARCOVERDE. 1971. **Aproveitamento Hidro-Agrícola do Açude Público Engenheiro Arcoverde-Pb**, DNOCS. Vol. I.

RIBEIRO, M.M.R. **Operação de reservatórios para usos de conservação**. Campina Grande: Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba, LMRS-PB, 1990.

RIPPL W. **The Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply**, Minutes of Proc. Inst. Civil Engrs. (London)71, 1883.

SOARES FILHO, Secundino; ANDRADE FILHO, M. G. Optimal Multiobjective Operational Planning of a Water Resources Systems. Organizado por M. Celia, L.Ferrand, C.Brebbia, W.Gray, G.Pinder. **Computer Methods In Water Resources: Numerical Methods for Transport and Hydrologic Process**, Southampton, Boston, p.127-134, 1988.

SUGAWARA, M. **Automatic Calibration of the Tank Model**. Hydrological Science Bulletin. v. 24, N. 3, pp. 375-358, 1979.

TUCCI, C. E. M. ; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e Evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2 ed.; 1. reimpr. – Porto Alegre: Editora Universidade, UFRGS: ABRH, 2000. 968 p. Inclui índice. ISBN 85-7025-298-6. Cap. 7.

VAUX JR., H. J.; PRUITT, W.O. **Crop-Water Production Function**. Adv. Irrig., v.2, p. 61-97. 1983.

ABSTRACT

MARINHO, Manoel H. N. Optimization Water Usage of Reservoir for Irrigation Purpose. 2001. 114f. Dissertation of Master's Degree - College of Civil Engineering, State University of Campinas, Campinas.

This work seeks to study the conditions of best operation of the system composed of the reservoir Engenheiro Arcoverde and irrigated perimeter, located in the neighborhood of the city of Condado, within a semi-arid region of the Paraíba state, northeast of Brazil. The objective is to develop and to apply models of it optimizes. The models optimize the operation of the reservoir of pluriannual regimen through the equation of hydric balance, using fixed and varied demands based on hydric balance of the selected cultures, establishing the supplemental liquid required of irrigation for each culture. The optimization process determines the irrigation lamina to be applied for each type of culture and the size of the areas to be irrigated for a selected group of cultures, in intention to maximize the liquid financial benefits gained by the irrigation of diverse agricultural cultures, saw the use of a method of lineal programming of deterministic form. Providing to the users of the water the largest benefits, they are these of economic or social character, generating a bigger number of jobs of basses and high wages. The software MATLAB® 5 (1999) was used to analyze the operation of the system in the study.

Key Words: optimization, reservoir operation, irrigated cultures, linear programming.

APÊNDICE

FORMULAÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR NO SOFTWARE MATLAB 5.0 (1999)

FUNÇÃO OBJETIVO

$$\text{MAX RL} = 7441.0C + 1332.0P + 8321.6T + 321.0Fs + 696.0Fe + 486.6Me + 1086.6Ms + 676.6A + 6869.5B + 950.2Z$$

Em que:

- RL : maximização da receita líquida em (R\$)
- C : área a ser plantada com cebola, em (ha)
- P : área a ser plantada com pimentão, em (ha)
- T : área a ser plantada com tomate, em (ha)
- Fs : área a ser plantada com feijão na safra, em (ha)
- Fe : área a ser plantada com feijão na entressafra, em (ha)
- Ms : área a ser plantada com milho na safra, em (ha)
- Me : área a ser plantada com milho na entressafra, em (ha)
- A : área a ser plantada com algodão, em (ha)
- B : área a ser plantada com banana, em (ha)
- Z : área a ser plantada com arroz, em (ha)

$$f = \begin{bmatrix} C & P & T & F_s & F_e & M_s & M_e & A & B & Z \\ -7441.0 & -1332.0 & -8321.6 & -321.0 & -696.0 & -486.6 & -1086.6 & -676.6 & -6869.5 & -950.2 \end{bmatrix};$$

RESTRIÇÕES:

a) RESTRIÇÕES DE LOCAÇÃO DE ÁREA IRRIGADA

$$A = \begin{bmatrix} C & P & T & F_s & F_e & M_s & M_e & A & B & Z \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

B) BALANÇO HÍDRICO DO RESERVATÓRIO

B1) RESTRIÇÕES PARA UM VOLUME $\geq 8.000.000 \text{ m}^3$

C	P	T	Fs	Fe	Ms	Me	A	B	Z
35,47	16,63	26,05	7,20	0,00	16,63	0,00	0,00	35,47	148,53
35,47	16,63	26,05	7,20	0,00	16,63	0,00	0,00	35,47	208,91
35,47	16,63	26,05	7,20	0,00	16,63	0,00	0,00	35,47	208,91
35,47	16,63	26,05	7,20	0,00	16,63	0,00	0,00	35,47	208,91
93,34	74,50	102,77	65,08	0,00	93,34	0,00	0,00	99,63	291,91
191,11	178,78	200,53	169,36	0,00	223,69	0,00	0,00	216,94	409,22
259,48	231,78	322,72	214,67	45,31	276,69	53,00	60,69	285,31	569,84
259,48	231,78	322,72	214,67	176,56	276,69	203,00	201,31	444,69	569,84
259,48	231,78	322,72	214,67	321,59	276,69	368,75	356,70	620,80	569,84
259,48	231,78	322,72	214,67	544,72	276,69	625,34	613,30	855,08	569,84
259,48	231,78	322,72	214,67	765,97	276,69	879,78	867,73	1087,39	569,84
259,48	231,78	322,72	214,67	962,69	276,69	1122,44	1052,97	1307,08	569,84

B2) RESTRIÇÕES PARA UM VOLUME $\leq 35.000.000 \text{ m}^3$

C	P	T	Fs	Fe	Ms	Me	A	B	Z
-35,47	-16,63	-26,05	-7,20	0,00	-16,63	0,00	0,00	-35,47	-148,53
-35,47	-16,63	-26,05	-7,20	0,00	-16,63	0,00	0,00	-35,47	-208,91
-35,47	-16,63	-26,05	-7,20	0,00	-16,63	0,00	0,00	-35,47	-208,91
-35,47	-16,63	-26,05	-7,20	0,00	-16,63	0,00	0,00	-35,47	-208,91
-93,34	-74,50	-102,77	-65,08	0,00	-93,34	0,00	0,00	-99,63	-291,91
-191,11	-178,78	-200,53	-169,36	0,00	-223,69	0,00	0,00	-216,94	-409,22
-259,48	-231,78	-322,72	-214,67	-45,31	-276,69	-53,00	-60,69	-285,31	-569,84
-259,48	-231,78	-322,72	-214,67	-176,56	-276,69	-203,00	-201,31	-444,69	-569,84
-259,48	-231,78	-322,72	-214,67	-321,59	-276,69	-368,75	-356,70	-620,80	-569,84
-259,48	-231,78	-322,72	-214,67	-544,72	-276,69	-625,34	-613,30	-855,08	-569,84
-259,48	-231,78	-322,72	-214,67	-765,97	-276,69	-879,78	-867,73	-1087,39	-569,84
-259,48	-231,78	-322,72	-214,67	-962,69	-276,69	-1122,44	-1052,97	-1307,08	-569,84

C) NÃO-NEGATIVIDADES

C	P	T	Fs	Fe	Ms	Me	A	B	Z
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

b=[

230	180	230	120	45
-30	45	-25	40	-25
60	-35	65	-30	60
-35	65	-30	65	-35
65	-35	50	-30	
11243853.575	12927319.426	17126810.470	23497825.685	18173301.317
17102300.296	16314748.473	14844113.860	13335390.534	11808206.776
10432057.826	9149358.416	15756146.425	14072680.574	9873189.530
3502174.315	8826698.683	9897699.704	10685251.527	12155886.140
13664609.466	15191793.224	16567942.174	17850641.584	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	

];

x = linprog(f,A,b)