Campus de São Carlos

Implantação de um Sistema de Apoio ao
Planejamento e Gerenciamento de Recursos
Hídricos na Bacia do Rio do Peixe, com Ênfase
ao Modelo de Transformação Chuva-Vazão

Cristiano das Neves Almeida

Orientador: Prof. Dr. Antônio Marozzi Righetto

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 03/10/01

Ass.: Guilherme

IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE APOIO AO
PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DE
RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO RIO DO PEIXE,
COM ÊNFASE AO MODELO DE TRANSFORMAÇÃO
CHUVA-VAZÃO

Cristiano Das Neves Almeida

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Hidráulica e
Saneamento.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036795

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto

São Carlos

2001

Class.	TESE
Cutl.	0239
Tombo	T0227/01

st 1207337

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A447i Almeida, Cristiano das Neves
Implantação de um sistema de apoio ao planejamento
e gerenciamento de recursos hídricos na bacia do Rio
do Peixe, com ênfase ao modelo de transformação chuva-
vazão / Cristiano das Neves Almeida. -- São Carlos,
2001.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto.

1. Gerenciamento. 2. Sistema de suporte a decisões.
3. Modelo chuva-vazão. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CRISTIANO DAS NEVES ALMEIDA**

Dissertação defendida e julgada em 27-07-2001 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Doutor **EDSON CEZAR WENDLAND**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Titular **ABEL MAIA GENOVEZ**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Profª. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação
em exercício

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiro ao criador supremo, Deus, em seguida aos que de alguma maneira incentivaram minha ida para o mestrado e a conclusão do mesmo, dentre estes os colegas de turma, os professores, orientador, amigos, e principalmente a minha família.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1.0 – INTRODUÇÃO	1
2.0 – OS MODELOS DE SIMULAÇÃO CHUVA – VAZÃO	3
2.1 – Uma breve classificação dos modelos matemáticos de simulação	4
2.2 – A utilização de modelos	7
2.3 – A utilização de modelos conceituais no Brasil	12
2.4 – Aplicações anteriores do AÇUMOD	26
3.0 – A BACIA HIDROGRÁFICA SIMULADA	30
3.1 – Localização	30
3.2 – Características fisiográficas	33
3.3 – Características geológicas, pedológicas e de cobertura vegetal	33
3.4 – Características climatológicas	38
3.5 – O regime pluviométrico	39
3.6 – O regime fluviométrico	41
3.7 – Os reservatórios superficiais	46
3.8 – As demandas	46
3.8.1 – O abastecimento humano	47
3.8.2 – A irrigação	50
4.0 – O MODELO DE SIMULAÇÃO CHUVA – VAZÃO	58
5.0 – A SIMULAÇÃO	71
5.1 – DADOS NECESSÁRIOS AO MODELO	72
5.1.1 – Discretização e atributos	72
5.1.1.1 – Elementos da arquitetura hidráulica	74
5.1.2 – Dados fluviométricos históricos e de níveis observados nos açudes	76
5.1.3 – Dados pluviométricos	76
5.1.4 – Dados evaporimétricos e de evapotranspiração	77
5.1.5 – Zonas hidrológicas homogêneas	78
5.1.6 – Operação dos açudes	82

5.1.7 – Período de simulação	85
5.1.7.1 – Período da calibração	86
5.1.7.2 – Período da validação	87
5.2 – CALIBRAÇÃO DO MODELO	89
5.2.1 – Análise paramétrica do modelo	101
5.3 – VALIDAÇÃO DO MODELO	105
5.4 – A POTENCIALIDADE DA BACIA	109
5.5 – A DISPONIBILIDADE DA BACIA	114
6.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	120
7.0 – CONCLUSÕES	123
ANEXOS	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Classificação dos modelos	6
FIGURA 3.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio do Peixe.....	31
FIGURA 3.2 – Localização dos municípios da bacia hidrográfica do rio do Peixe.....	32
FIGURA 3.3 – Mapa geológico da bacia do rio do Peixe.....	35
FIGURA 3.4 – Mapa de solos da bacia do rio do Peixe.....	36
FIGURA 3.5 – Mapa da cobertura vegetal da bacia do rio do Peixe.....	37
FIGURA 3.6 – Espacialização da precipitação pelo método de Thiessen.....	40
FIGURA 3.7 – Localização dos principais açudes, postos fluviométricos e sub-bacias.....	45
FIGURA 4.1 – Conjunto de reservatório que simulam o ciclo hidrológico.....	58
FIGURA 4.2 – Discretização da quadrícula.....	61
FIGURA 4.3 – Sentidos de drenagem.....	63
FIGURA 4.4 – Reservatório Solo.....	64
FIGURA 4.5 – Primeiro termo da componente ÁGUA.....	64
FIGURA 4.6 – Segundo termo da componente ÁGUA.....	64
FIGURA 4.7 – Zonas isócronas.....	68
FIGURA 5.1 – Tela de entrada do AÇUMOD.....	71
FIGURA 5.2 – Janela principal do programa.....	72
FIGURA 5.3 – Janela do sub-módulo de Implantação Bacia.....	73
FIGURA 5.4 – Janela de entrada das informações das quadrículas.....	74
FIGURA 5.5 – Janela para processamento dos cálculos do Thiessen.....	77
FIGURA 5.6 – Definição das zonas hidrológicas homogêneas.....	81
FIGURA 5.7 – Organograma do MAINGEO e do AÇUMOD.....	84
FIGURA 5.8 – Janela do sub-módulo Escolha do período de simulação.....	86
FIGURA 5.9 – Janela do sub-módulo CALIBRAÇÃO.....	90
FIGURA 5.10 – Níveis simulados X observados para o açude Lagoa do Arroz.....	98
FIGURA 5.11 – Níveis simulados X observados para o açude Arrojado.....	99
FIGURA 5.12 – Vazões calculadas X observadas para o posto fluviométrico de Aparecida.....	100
FIGURA 5.13 – Janela de escolha do conjunto de parâmetros para validação.....	106
FIGURA 5.14 – Vazões calculadas X observadas para o posto fluviométrico de Antenor Navarro.....	108
FIGURA 5.15 – Janela do sub-módulo <i>POTENCIALIDADE</i>	110

FIGURA 5.16 – Curva de frequência para a bacia hidrográfica do aç. Lagoa do Arroz..	112
FIGURA 5.17 – Hidrograma de vazões geradas para a bacia hidrográfica do aç. Lagoa do Arroz.....	114
FIGURA 5.18 – Esquema da estrutura hidráulica dos açudes da bacia do rio do Peixe.....	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Algumas bacias onde o MODHAC já foi ajustado.....	14
TABELA 2.2 – Comparação de alguns modelos conceituais chuva-vazão.....	16
TABELA 2.3 – Picos e volumes simulados com diferentes discretizações.....	21
TABELA 3.1 – Evaporação Média Mensal do Tanque Classe A (mm).....	38
TABELA 3.2 – Postos pluviométricos utilizados no estudo.....	40
TABELA 3.3 – Médias mensais de descarga no posto Antenor Navarro (m^3/s), primeiro período.....	41
TABELA 3.4 – Médias mensais de descargas no posto Antenor Navarro (m^3/s), segundo período.....	42
TABELA 3.5 – Médias mensais de descarga no posto Aparecida (m^3/s).....	42
TABELA 3.6 – Resumo dos resultados do estudo de previsão populacional.....	48
TABELA 3.7 – Demandas para o abastecimento humano (em l/s).....	49
TABELA 3.8 – Áreas das principais culturas por município (em ha).....	51
TABELA 3.9 – Evapotranspiração média diária (mm/dia).....	52
TABELA 3.10 – Coeficientes médios mensais de cultivos.....	54
TABELA 3.11 – Lâmina mensal para a irrigação (mm/dia).....	55
TABELA 3.12 – Vazões demandas para a irrigação por município (l/s).....	56
TABELA 3.13 – Resumo das demandas para a irrigação (em $\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$).....	57
TABELA 5.1 – Características das zonas hidrológicas homogêneas.....	79
TABELA 5.2 – Operação do açude Lagoa do Arroz.....	83
TABELA 5.3 – Período dos dados observados para os pontos utilizados na calibração.....	87
TABELA 5.4 – Parâmetros do modelo calibrado.....	96
TABELA 5.5 – Índices indicadores da qualidade de calibração.....	97
TABELA 5.6 – Índices indicadores da qualidade da validação.....	107
TABELA 5.7 – Potencialidades das sub-bacias e açudes.....	110
TABELA 5.8 – Disponibilidades dos açudes da bacia do rio do Peixe.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	– Agência Nacional de Águas
SCS	– Soil Conservation Service
SCIENTEC	– Associação para Desenvolvimento da Tecnologia e Ciência
DNAEE	– Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
CNPq	– Conselho Nacional de Pesquisa Científica
ORSTOM	– Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
CEEIVAP	– Comitê Executivo de Estudos Integrados da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
SIG	– Sistema de Informações Geográfica
PDRH-PB	– Plano Diretor de Recursos Hídrico do Estado da Paraíba
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
DNOCS	– Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
FO	– Função Objetivo
IIQC	– Índices Indicadores de Qualidade da Calibração
IIQV	– Índices Indicadores de Qualidade da Validação
SUDENE	– Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

RESUMO

O problema da escassez de água para o abastecimento humano vem se agravando a cada ano que passa. As demandas vêm crescendo e precisam ser supridas da melhor possível sob pena de limitar o processo de desenvolvimento regional. Para tanto, deve-se recorrer ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos como forma de se promover o seu uso racional. Descreve-se neste trabalho a implantação de um sistema de apoio ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, dando uma maior ênfase ao modelo hidrológico distribuído utilizado para gerar as vazões na bacia hidrográfica. Avalia-se sua calibração e validação realizada com dados fluviométricos e de níveis de açudes. Apresentam-se os resultados do estudo de potencialidade da bacia hidrográfica, e por último as disponibilidades dos principais açudes. Todas estas etapas foram realizadas tendo sempre a visão espacializada e integrada da bacia hidrográfica do rio do Peixe.

Palavras-chave: Gerenciamento, Sistema de Suporte a Decisões, Modelo chuva-vazão.

ABSTRACT

The problem of scarcity of water for human supply has increased each year. The needs have increased and must be fulfilled as satisfactory as possible. If not the development process of the region could be limited. In this way, we must use the planning and management of water resources to promote a rational use. This dissertation describes the implantation of a support system to the planning and management of water resources, focusing the hydrologic distributed model used to generate the inflows in the basin. The calibration and validation processes with sets of data formed by gauge stream go stations and reservoir levels are analyzed. The results of a study of the potentiality of the basin, and finally the availability of the mains reservoirs are presented. All this steps were made with a specialized and integrated view of the Peixe river basin.

Keywords: Management, Decision Support System, Rainfall-runoff models.

1.0 – INTRODUÇÃO

Nos países em desenvolvimento há frequentemente escassez de informações fluviométricas. Em contrapartida, a quantidade e a qualidade dos dados pluviométricos são consideradas muito boas. Na maioria das bacias hidrográficas do nordeste do Brasil faltam dados fluviométrico. No entanto a rede pluviométrica é relativamente densa. Desta maneira a utilização de modelos matemáticos conceituais, concentrados ou distribuídos, de transformação chuva-vazão é indispensável. A utilização dos dados fluviométricos, mesmo que precários, é fundamental nos estudos de modelagem e de uso racional de recursos hídricos.

A necessidade constante e crescente de tomadas de decisões acerca do gerenciamento e planejamento de recursos hídricos tem levado os hidrólogos a recorrerem a estes modelos também.

Diante de tais situações, tem-se buscado avaliar as interações possíveis entre modelos hidrológicos e os Sistemas de Informações Geográficas, objetivando criar mecanismos de análise de cenários de usos de recursos hídricos, com vistas a facilitar os processos decisórios. Desta maneira, o principal objetivo deste estudo foi a implantação de um sistema de apoio ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, quem tem como modelo de transformação Chuva-Vazão, o **AÇUMOD** (PASSERAT DE SILANS, 1999).

Assim, descreve-se neste trabalho todas as etapas envolvidas na implementação deste Sistema de Suporte a Decisões (SSD), dando maior ênfase ao estudo do modelo hidrológico. O SSD é composto de 5 sub-módulos: Implantação e discretização da bacia hidrográfica; Escolha do período de simulação; Calibração do modelo; Validação do modelo; Cálculo das potencialidades da bacia hidrográfica; E determinação da disponibilidade dos mananciais superficiais. Todo o sistema foi desenvolvido em Delphi, linguagem orientada a objetos para ambiente Windows®, o que facilita seu uso por parte dos técnicos.

O modelo AÇUMOD foi escolhido para tais estudos em função das suas principais características: Consideração das informações hidro-climáticas (precipitação, evaporação, etc.) distribuídas no espaço e no tempo; Possibilidade de calibração com dados fluviométricos e dados de níveis de açudes; Geração de informações fluviométricas em qualquer ponto previamente definido; Incorporação do balanço hídricos dos açudes em seu

algoritmo; Incorporação da operação do sistema hídrico. Face à quantidade de ferramentas oferecidas por este modelo e, principalmente, por este considerar as informações espacialmente distribuídas, decidiu-se avaliar a possibilidade da utilização deste modelo para aplicações de gerenciamento e planejamento de recursos hídricos.

Assim, esta dissertação apresenta a implementação deste SSD à bacia do rio do Peixe, além de modelagem hidrológica desta bacia, uma importante e instrumentada bacia do Estado da Paraíba. Para tanto, inicia-se o trabalho apresentando uma revisão acerca da utilização de modelos de transformação chuva-vazão, dentro de um contexto mais geral até se chegar a um contexto regional. Em seguida, descreve-se a bacia hidrográfica estudada, desde suas características físicas até suas demandas hídricas. Apresenta-se a estrutura do modelo de simulação utilizado, bem como seus arquivos de entrada e saída, e etapas para formação dos mesmos. Por último, são descritos os procedimentos adotados para a simulação hidrológica da bacia hidrográfica, destacando-se os processos de calibração, validação, e a determinação da potencialidade e disponibilidade hídricas. Durante cada uma destas etapas, faz-se uma análise dos resultados obtidos separadamente, até se chegar às conclusões finais, que destacam a performance e a adequação do modelo para tais fins.

2.0 – OS MODELOS DE SIMULAÇÃO CHUVA – VAZÃO

Há, hoje, no Brasil, um direcionamento de estudos e ações para o planejamento e gerenciamento racional dos recursos hídricos. Como marco inicial destas ações, tem-se a aprovação, pelo poder Legislativo e Executivo, da Lei 9433/97, denominada de “Lei das Águas”, e, mais recentemente, a tramitação do projeto de lei para a criação da Agência Nacional das Águas (ANA).

Apesar desses esforços, muitos são os problemas que os engenheiros e técnicos encontraram para implantar os Sistemas de Suporte à Decisão (AZEVEDO et al., 1998), uma vez que os estudos relativos ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos têm como principal finalidade promover uma distribuição racional da água com qualidade, bem como assegurá-la para usos no futuro. Assim, quando se comenta o quesito quantidade, faz-se necessário que se tenha para as bacias hidrográficas um banco de dados com informações hidro-climáticas, como por exemplo, dados de precipitação, evapotranspiração, e principalmente, de vazão. Aqui, encontra-se o grande problema de países em desenvolvimento, que, geralmente, não possuem tais informações em escala espacial e temporal (MEHROTRA & SINGH, 1998). Dessa forma, é necessário, que engenheiros e técnicos se utilizem de modelos matemáticos de simulação para conseguirem gerar dados sintéticos de deflúvios.

E é neste contexto que estão inseridos os objetivos desta dissertação de mestrado, uma vez que se pretende implantar, para a bacia hidrográfica do Rio Peixe, um Sistema de Apoio ao Planejamento e Gerenciamento – SAPO – (ALMEIDA et al., 1999) apoiado num modelo hidrológico conceitual distribuído, de transformação de precipitação em vazão, denominado AÇUMOD (PASSERAT DE SILANS et al., 1998). Tal modelo é uma adaptação do SIMMQE (DNAEE, 1983a), desenvolvido pela ORSTOM. Na sua concepção atual, foram introduzidas algumas modificações, de forma a torná-lo mais adequado às regiões semi-áridas. Assim, com esse modelo podem ser geradas vazões em pontos específicos, a partir de dados diários de precipitação, os quais são mais facilmente encontrados, e de dados de evapotranspiração potencial.

2.1 – Uma breve classificação dos modelos matemáticos de simulação

A necessidade de uma melhor interpretação dos fenômenos que regem o ciclo hidrológico, associado à escassez de medições de dados hidro-climáticos, em bacias hidrográficas, levaram pesquisadores a desenvolverem modelos de simulação do ciclo hidrológico, baseados em conceitos físicos e matemáticos (MEHROTRA & SINGH, 1998), tendo como marco referencial a elaboração do modelo de simulação digital feita por LINSLEY & CRAWFORD, em 1966, denominado Stanford Watershed Model (SWM) (DINIZ, 1994).

Desse período em diante, proporcionais aos grandes avanços tecnológicos, na área computacional, ocorreram e continuam ocorrendo desenvolvimentos e melhoramentos dos modelos matemáticos de simulação. Tantos foram, que seus objetivos se ampliaram. Segundo LANNA apud MARWELL (1985) as técnicas de simulação permitem:

- Estudar e experimentar as complexas interações internas de um determinado sistema hidrológico ou de recursos hídricos;
- Oferecer valiosa intuição no sentido do conhecimento das variáveis mais atuantes no sistema e caracterizar a influência destas variáveis sobre tal sistema;
- Fornecer previsão a respeito de situações sobre as quais se têm pouca ou nenhuma informação.

De uma maneira geral, as técnicas de simulação buscam representar, o mais perfeito possível, o comportamento exógeno de um sistema. Tais técnicas podem ser classificadas em físicas, analógicas e matemáticas. Uma definição mais detalhada a respeito de cada uma destas técnicas apresenta-se em seguida:

- Modelo Físico – busca o entendimento de certos fenômenos pelo estudo de um sistema semelhante, em proporções menores. Os também conhecidos modelos reduzidos têm seu uso dirigido a sistemas muito complexos, de difícil equacionamento matemático.

- Modelo Analógico – utilizado para prever e interpretar fenômenos que têm conteúdo e forma diferenciados, porém apresentam semelhança na estrutura ou lei de formação.
- Modelo matemático – este procura simular e entender um determinado sistema através de equações matemáticas, formadas por variáveis e parâmetros. Os modelos matemáticos na concepção de TUCCI apud MARWELL (1985), são versáteis, permitindo facilmente modificar-se a lógica do modelo e obter-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da grande velocidade obtida no seu processamento em micro computadores.

Como o presente estudo está intimamente relacionado com um modelo matemático, faz-se necessário um melhor detalhamento desta classe de modelos. Os modelos matemáticos de simulação dividem-se em determinísticos e estatísticos. Os estatísticos dividem-se em 3 grupos: probabilísticos, de regressão e correlação e, os estocásticos. Já os determinísticos, que será alvo do estudo, se agrupam em empíricos e conceituais. Os empíricos procuram representar determinado fenômeno por uma equação matemática, quando não se conhecem os mecanismos que regulam o processo. Diferentemente, nos conceituais os processos são simulados por funções e reservatórios, mesmo que não se conheça a relação entre os diversos processos envolvidos (DINIZ, 1994).

Na Figura 2.1 tem-se uma classificação dos modelos.

Figura 2.1 – Classificação dos modelos.

Os modelos conceituais se dividem em lineares e não lineares. Esta classificação é feita de acordo com as equações utilizadas para a simulação. Segundo TUCCI (1998), a condição de um sistema possuir comportamento linear, é a validade do princípio da superposição. Este princípio é caracterizado da seguinte maneira, considere que y_1 é uma entrada do sistema que produz a saída x_1 . Da mesma forma, a entrada x_2 resulta na saída x_2 do mesmo sistema. O princípio da superposição é validado quando, a entrada $y_1 + y_2$ produzir a saída $x_1 + x_2$ neste mesmo sistema. Outra característica de um sistema linear é a homogeneidade.

Nota-se, ainda, a partir da figura 2.1, que os modelos podem ser concentrados ou distribuídos, de acordo com seu tipo de parâmetro. Os modelos conceituais com parâmetros concentrados são descritos por equações diferenciais totais, de modo que as funções de entrada e saída dependem somente do tempo. Os modelos conceituais com parâmetros distribuídos são descritos por equações parciais, sendo possível descrever, de forma compreensível, a heterogeneidade espacial não somente destes parâmetros como também das variáveis de entrada e saída. (DINIZ, 1994)

O modelo a ser utilizado para a geração das vazões neste estudo é um modelo do tipo conceitual não linear distribuído, denominado AÇUMOD, o qual será descrito mais adiante.

2.2 – A utilização de modelos

A falta de uma rede de monitoramento adequada e de boa qualidade, em geral, é um problema dos países em desenvolvimento (MEHROTRA & SINGH, 1998). Diferentemente, os países mais desenvolvidos contam com boa densidade de postos fluviométricos, tendo assim, um vasto e qualificado banco de dados com tais informações. Seria, então, aparentemente desnecessário que países com uma significativa rede de monitoramento investissem tanta tecnologia em modelos matemáticos de simulação de precipitação em vazão. No entanto, constata-se que países como a França e EUA, direcionam muitos de seus estudos para essa área da Hidrologia, dada a importância dos modelos matemáticos para gerenciamento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. Isto objetivando um melhor entendimento dos processos que regem o ciclo hidrológico. Sendo assim, verifica-se que a preocupação com o desenvolvimento e melhoramento dos modelos não é uma questão apenas de países com escassez de dados fluviométricos.

Dois dos campos de aplicação dos modelos distribuídos conforme KUCZERA (1983a) apud RUTUNNO FILHO (1991) são:

- Acesso aos efeitos provenientes das mudanças no uso do solo;
- Predição de vazões provenientes das mudanças no uso do solo;

Recentemente, os modelos hidrológicos vêm sendo empregados para estudar os impactos causados pelas mudanças climáticas (SCHAAKE & LIU, 1989; ARNALL, 1992 apud XU & SINGH, 1998). Assim, muitos modelos são implementados com sub-modelos de forma a torná-los mais abrangentes. É o caso do MODCOU (LEDOUX et al., 1989; GIRARD, 1974 apud HABETS et al., 1999). Este modelo foi implementado com um modelo de circulação atmosférica, denominado ISBA (Interface Soil Biosphere) (HABETS et al., 1999). Este conjunto

de modelos foi aplicado na bacia de Adour, França, mostrando que a integração do ISBA com o MODCOU apresentou uma melhora na simulação do balanço hídrico e no balanço energético do solo, tanto que, para a calibração, foram utilizadas medições fluviométricas de um ano considerado normal, do ponto de vista climatológico, e, para a validação, utilizam-se dados fluviométricos de outro ano, considerado como sendo seco.

Tamanha é a diversidade e a aplicação destes modelos, que muitos pesquisadores promoveram estudos objetivando avaliar e comparar as potencialidades dos modelos de simulação hidrológica.

CHIEW et al. (1993) realizaram uma comparação entre modelos de simulação chuva-vazão. Para tal estudo foram utilizados 6 modelos: equação polinomial simples; equação de processo simplificado (Equação da tangente hiperbólica); equação de séries temporais simples (Equação de Tsykin); modelo de séries temporais complexas (IHACRES); modelo conceitual simples (SFB); e um modelo conceitual mais complexo o HODHYDROLOG.

Estes 6 modelos foram aplicados em 8 bacias (Alligator Creek em Allendale; Rio Corang em Hockeys; Jimmy Creek em Jimmy Creek; Rio Davey, no baixo curso do Rio Crossing; Rio Dandongadale em Matong North; Kanyaka Creek no Velho Kanyaka; Rio Canning em Glen Eagle; e Mitcheel Grass em Richmond) de diversas áreas (respectivas áreas, em km²: 69; 166; 23; 686; 182; 180; 544; 3), na Austrália, sendo que cada uma destas tinha suas características hidro-climáticas bem distintas da outra, as quais variavam de áridas a úmidas.

O estudo baseou-se na simulação de vazões diárias, mensais e anuais. A geração destas vazões foi realizada a partir da minimização de 2 funções objetivo, que relacionavam as vazões observadas com as calculadas, sendo que uma função priorizava as vazões de baixa magnitude e a outra as de alta magnitude.

Ao final do estudo, os autores concluíram que 2 modelos conceituais (o SFB e o HODHYDROLOG) foram os mais adequados, sendo que o que tinha a estrutura mais complexa foi, de longe, o melhor para a geração de séries diárias, em bacias com vazões de baixa magnitude. Na geração de séries mensais também este foi o melhor, uma vez que simulou adequadamente as vazões mensais em quase todas as bacias, com exceção da bacia de clima árido, em que menos de 1% da

precipitação anual se transforma em escoamento superficial. E, por último, na simulação das vazões anuais, o modelo conceitual complexo gerou vazões quase que iguais às observadas, para todas as 8 bacias estudadas. Contudo, os autores enfatizaram que o modelo conceitual de estrutura simples pode ser, satisfatoriamente utilizado para gerar vazões a nível mensais e anuais, em bacias de clima úmido, em que mais de 10% da precipitação anual se transforma em vazão, em mais de 70% do tempo.

De qualquer maneira, o que de mais expressivo se pode concluir deste estudo é que a utilização de modelos matemáticos do tipo conceitual é mais adequada para a simulação de vazões, seja qual for a condição climática da bacia ou passo temporal para geração de deflúvios.

Outro estudo objetivando realizar uma revisão sobre a utilização de modelos a nível mensal foi desenvolvido por XU & SINGH (1998), mais precisamente sobre o estado da arte, as suposições e limitações destes modelos, bem como suas aplicações.

Inicialmente, os autores avaliaram alguns modelos mensais (Modelo do Tennessee Valley Authority; Uma versão modificada do Fiering; Um modelo de reservatório linear simples; e um modelo não-linear), que têm como entrada a precipitação, esse tipo de modelo pode ser muito útil, pois em muitos países há uma grande quantidade de dados pluviométricos, o que não ocorrem com outros tipos de dados hidro-climáticos. Em seguida são descritas as estruturas e características de modelos que têm apenas a precipitação como dado de entrada. Segundo eles, a evapotranspiração é calculada como sendo uma fração da precipitação e o resto da chuva é dividido empiricamente em infiltração e/ou escoamento direto. Deve-se ter uma relativa precaução na utilização desse tipo de modelo.

Noutro tópico, desse trabalho são estudados 4 modelos conceituais (O modelo de Thornthwaite e Mather; O modelo de Alley; O modelo ABCD de Thomas; E o P-Model de Palmer e Alley), todos com passo de tempo mensal. Estes modelos têm como dados de entrada a precipitação e a temperatura, e procuram simular o ciclo hidrológico através de 2 reservatórios. A diferença entre estes modelos encontra-se na forma como se trata o relacionamento entre a evapotranspiração real e potencial, no balanço da umidade do solo e na recarga do

aquífero. A principal característica desses 4 modelos é que a temperatura é utilizada para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Thornthwaite. ALLEY (1984) apud XU & SINGH (1998) concluiu que esses modelos são bons para simular vazões anuais, mas não são tão bons para a simulação das vazões mensais.

Mais adiante, são comparados 4 modelos determinísticos (PITMAN, 1973, 1978; ROBERTS, 1979; SALAS et al., 1986; HUGHES, 1982), que necessitam da precipitação e da evapotranspiração mensal como dados de entrada. Tais modelos são criticados pelo elevado número de parâmetros a serem calibrados, os quais variam de 8 a 12, e pelas suas estruturas, também consideradas complexas. VANDEWIELE et al. (1992) e XU (1992) propuseram uma série de modelos modificados do modelo de simulação mensal desenvolvido por VAN DER BEKEN & BYLOOS (1977), sendo estes modelos dependentes, em geral, de 3 parâmetros, e alguns de até 4 parâmetros. Estes foram aplicados com sucesso em quase 100 bacias hidrográficas da Bélgica, China e Burma.

E, por último, foram avaliados 3 modelos conceituais (O modelo de HAAN, 1972; KUCZERA, 1983b; O modelo de Bouhton de 1973, modificado por MCMAHO & MEIN), como intervalo de tempo de 1 dia para geração de vazões mensais. Para tanto, foram necessários dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial. Acredita-se que a utilização de dados de precipitação diária melhora a estimativa dos processos de infiltração, evapotranspiração, interceptação e armazenamento em depressões. Por outro lado, a utilização de dados diários aumenta consideravelmente o trabalho de preparação dos dados.

Com relação às possíveis aplicações dos modelos mensais, os autores afirmam que, para estudos de avaliação dos impactos causados pelas mudanças climáticas, os modelos com embasamento físicos e os empíricos, também denominados de “caixa preta”, não são indicados, uma vez que, os físicos necessitam de grande quantidade de dados com alta resolução, temporal e espacial, o que é de difícil disponibilidade. Já os modelos empíricos refletem com simplicidade a corrente relação entre o clima e a resposta hidrológica, sendo, assim, inválidos para outras circunstâncias de mudanças climáticas.

Outros dois usos relatados pelos autores são a previsão de vazões para projetos hidráulicos e a geração de vazões em bacias hidrográficas sem

monitoramento. Sendo mais expressiva a opinião sobre o segundo tipo de aplicação, pois, segundo os pesquisadores, um dos principais objetivos dos modelos conceituais mensais é a sua aplicação em bacias, sem medição, para a geração de séries sintéticas necessárias ao planejamento.

Dentre as várias conclusões desse artigo duas merecem um comentário: A primeira refere-se ao uso de modelos em escala temporal mensal. Segundo os autores, estes se adequam ao planejamento e a predição dos efeitos das mudanças climáticas, pois as descargas mensais devem ser suficientes para tal propósito. O segundo comentário diz respeito à quantidade de parâmetros dos modelos. Afirma-se que de 3 a 5 parâmetros são suficientes para simular o ciclo hidrológico em regiões úmidas. Porém, para modelos de estrutura complexa para regiões áridas e semi-áridas, como algumas bacias africanas, o mesmo não se aplica.

Dentre os vários artigos que tratam da comparação de modelos hidrológicos, pode-se citar, ainda, o recente estudo realizado por MEHROTRA & SINGH (1998). Neste estudo, procurou-se avaliar a estrutura de 6 modelos mensais (O modelo STAT, do tipo estatístico linear simples; O STP1, que considera apenas o reservatório solo; O STP2, que considera o excesso do reservatório solo como escoamento superficial direto; O SCS, baseado na separação sequencial da precipitação em escoamento superficial e infiltrado; O WBSIMP, que considera o reservatório solo e subterrâneo; O WBCOMP, de estrutura semelhante ao WBSIMP, porém considerando as áreas impermeáveis da bacia hidrográfica), os quais foram aplicados a bacias hidrográficas de comportamento climático diferentes, localizadas na Índia Central.

Para a realização deste estudo foram escolhidas 12 bacias hidrográficas, com áreas variando de 85 a 4980 km² e climas variando do árido ao úmido, sendo a maioria do tipo árido e semi-árido.

Dentre os 6 modelos escolhidos, apenas 1 (o STAT) é baseado em equações estatísticas. Os outros, são do tipo conceitual, sendo que 2 modelos consideram 1 reservatório - o reservatório solo (STP1 e STP2), enquanto que os demais modelos (SCS, WBSIMP e WBCOMP) consideram também o reservatório subterrâneo.

Para avaliar estes modelos foram utilizados 2 critérios. Um deles, foi a comparação entre as curvas de garantia geradas por cada técnica, e o outro, foi a comparação entre as vazões simuladas e históricas, através de uma função objetivo.

Por meio destes critérios, verificou-se que os modelos tiveram igual performance para as regiões úmidas, porém, para as regiões áridas e semi-áridas, os 2 modelos, que tinham mais parâmetros e apresentavam 2 reservatórios em suas estruturas, se mostraram mais adequados a estas regiões, o WBSIMP e o WBCOMP. Isto se deve, principalmente ao número de parâmetros, pois, estes são capazes de simular melhor o ciclo hidrológico.

Através desses artigos, pode-se ter uma idéia mais abrangente sobre os tipos de modelos mais utilizados para simular o ciclo hidrológico em bacias hidrográficas, que são os conceituais, variando sempre na concepção de sua estrutura e nos números de parâmetros. Pode-se, ainda, ter uma visão sobre suas possíveis aplicações, que hoje vão desde a geração de séries de vazões sintéticas até a avaliação dos impactos causados pelas mudanças climáticas.

2.3 – A utilização de modelos conceituais no Brasil

No Brasil, igualmente a outros países em desenvolvimento, é notável a necessidade da utilização de modelos matemáticos para a simulação do ciclo hidrológico, principalmente para a reconstituição de vazões naturais. Tal aplicação faz-se necessária em face à quantidade e qualidade dos dados fluviométricos disponíveis no Brasil, pois são poucas as séries que ultrapassam 10 anos.

No entanto, a utilização dos modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão não se restringe, apenas, à citada anteriormente. Segundo KUCZERA apud RUTUNNO FILHO et al. (1991), a literatura destaca cinco grandes campos de aplicação destes modelos:

- Extensão de séries de descargas;
- Geração de estatísticas sobre descargas;
- Acesso aos efeitos provenientes das mudanças do uso do solo;
- Predição de vazões em bacias não monitoradas;

- Predição de vazões provenientes das mudanças do uso do solo;

Segundo RUTUNNO FILHO (1991), as três primeiras aplicações foram realizadas com relativo sucesso. Já as duas últimas têm encontrado grandes dificuldades de apresentarem resultados satisfatórios. Basicamente, o problema surge quando é tentado o desenvolvimento de relação de regressão entre os parâmetros oriundos de um processo de ajustamento e características físicas da bacia hidrográfica. As dificuldades apresentadas decorrem de não termos um modelo suficientemente ajustado. Estar-se-á caminhando, possivelmente, na direção de um modelo adequado, quando se lançar mão da discretização e se passar, então, de modelos hidrológicos concentrados para os distribuídos. Esses ganhos que se obtêm a partir da discretização da bacia são notáveis na comparação de resultados das aplicações dos modelos que vai desde o cálculo do balanço hídrico de longo curso d'água ao uso de modelos chuva-vazão, que geram com intervalos mensais, diários ou menores do que o dia.

Mediante os campos de aplicação dos modelos citados anteriormente, e também, a busca de um melhor entendimento dos processos hidrológicos, é que, no início da década de 80, surgiram os primeiros modelos conceituais do tipo chuva-vazão. Em 1981, LOPES et al. publicaram um artigo descrevendo a estrutura do conhecido modelo SMAP, bem como a sua aplicação a algumas bacias. Segundo os autores, o modelo tem uma estrutura relativamente simples e opera com dados de chuva diária e médias mensais de evaporação potencial. O modelo encontra-se fundamentado em 3 reservatórios lineares, que representam a superfície e as zonas não-saturadas e saturadas do solo, nos quais é processado o balanço da umidade do solo. O modelo utiliza a equação de escoamento superficial do Soil Conservation Service (SCS), para o cálculo da chuva excedente, e é formado por poucos parâmetros, os quais são facilmente definidos em função do tipo de solo e cobertura vegetal.

O SMAP foi aplicado a quatro bacias. Três destas se localizam no Estado de São Paulo: Rio Pinheirinhos, Rio Camandacua e Rio Jaguari, com as respectivas áreas de 113 km², 928 km² e 3399 km². Essas bacias apresentam um comportamento regular, do ponto de vista hidro-climático. A quarta bacia, para qual

o modelo foi aplicado, é a bacia do Rio do Peixe, localizada no Estado da Paraíba. Esta última bacia foi escolhida com o objetivo de avaliar o comportamento do modelo em condições extremas, típicas do Nordeste Brasileiro (altas taxas de evaporação potencial e pouca pluviosidade).

Nos resultados obtidos, diferenças entre os valores mensais calculados e observados foram em geral menores que 20%, sendo, assim, considerados satisfatórios, levando-se em consideração as incertezas inerentes aos dados hidrológicos básicos. Ao final do estudo, os autores, apesar de naquela época ainda não terem sido realizados muitos testes, recomendavam a utilização do SMAP em bacias hidrográficas com área de drenagem inferior a 1000 km², isto em função da elevada variabilidade espacial da precipitação.

Outro modelo hidrológico de uso consolidado no Brasil é o Modelo Hidrológico Auto Calibrável – MODHAC, o qual teve sua primeira versão apresentada por SCHWARZBACH & LANNA (1989). Este modelo concentrado, do tipo chuva-vazão, teve seu desenvolvimento para ser aplicado tanto a bacias do semi-árido Nordestino quanto para regiões de clima temperado úmido do Sul do Brasil. Desta forma, presume-se que esse modelo possa ser aplicado a bacias de características diversas, não importando os aspectos climáticos, pedológicos, topográficos, geológicos e de cobertura vegetal existentes (SCHWARZBACH & LANNA, 1989). A tabela 2.1 apresentada por LANNA (1996) mostra algumas bacias para as quais o modelo foi aplicado.

TABELA 2.1 – Algumas bacias onde o MODHAC já foi ajustado

Bacia	Estado	Referência – Entidade contratante
• Bacias representativas do Nordeste: Tauá, Juatama, Sumé e Riacho do Navio	CE, PB e PE	Teste dos autores
• Rio Pajeú	CE	Teste dos autores
• Todas	CE	Plano Estadual de Recursos Hídricos – Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará

O MODHAC simula a fase terrestre do ciclo hidrológico, encontrando-se conceitualizado em três reservatórios fictícios, que procuram simular a água armazenada nas regiões superficial, subsuperficial e subterrânea. Ele tem como principal característica a possibilidade da determinação automática de seus parâmetros, através de uma técnica de otimização, a qual procura ajustar as vazões calculadas às observadas.

Apesar deste modelo ter seu uso bastante difundido entre profissionais da área de recursos hídricos, o próprio autor apresentou algumas críticas sobre sua concepção. O ponto mais importante encontra-se na pretensão de simular os processos hidrológicos, sem consideração de sua variabilidade espacial, resultante da heterogeneidade das características topográficas, pedológicas, geológicas e de cobertura vegetal das bacias hidrográficas.

Uma recente aplicação do MODHAC, que vale ser comentada, diz respeito a sua utilização para a geração de séries temporais de deflúvios naturais no âmbito do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte (SCIENTEC, 1998). Neste estudo, o MODHAC foi utilizado para a geração de vazões mensais nas seguintes sub-bacias: Rio do Peixe, Rio Piancó, do Alto Piranhas, do Média Piranhas, do rio Espinharas e do rio Seridó. Este conjunto de sub-bacias formam a parte Paraibana da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu. O grande problema enfrentado para a realização desse estudo refere-se à má qualidade dos dados existentes, à existência de uma bacia não monitorada, e à pequena disponibilidade de dados. Como exemplo destes problemas, cita-se as características dos postos instalados na parcela Paraibana da bacia do Espinharas:

- Curta extensão das séries observadas;
- Ocorrência de diversas falhas de observação;
- Postos instalados a jusante de reservatórios de porte e funcionando após o início da operação daqueles, sendo, portanto, todos os registros influenciados pelo reservatório.

Assim, descartou-se a utilização de um conjunto de postos existentes na área de estudo, para a finalidade de calibração e validação do modelo chuva-vazão. Em resumo, tais problemas foram resolvidos adotando-se dados de postos

fluviométricos vizinhos, os quais foram utilizados para a calibração e validação, e em seguida procedeu-se a uma regionalização de parâmetros entre as bacias estudadas.

O Tank Model (SUGAWARA, 1973 apud GÓIS et al., 1996) é outro modelo conceitual concentrado o qual, ainda que não seja muito utilizado no Brasil, tem-se mostrado bastante eficiente na transformação de chuva em vazão. Tanto é que, um estudo comparando-se sete modelos bem difundidos mundialmente, o modelo Tank Model foi classificado como um dos melhores. Tal classificação pode ser vista na tabela 2.2 (FRANCHINI & PACCIANI, 1990 apud DINIZ, 1994).

TABELA 2.2 – Comparação de alguns modelos conceituais chuva-vazão

Modelo	Variância		Coef. Determinação		Coef. Correlação	
	Calib.	Simul.	Calib.	Simul.	Calib.	Simul.
SANTFORD IV	0,843	0,845	0,830	0,844	0,911	0,919
SACRAMENTO	0,836	0,835	0,821	0,833	0,906	0,913
TANK	0,875	0,847	0,856	0,845	0,925	0,919
APIC	0,766	0,820	0,751	0,779	0,866	0,883
SSARR	0,867	0,834	0,829	0,824	0,910	0,908
XINANJIANG	0,880	0,822	0,840	0,821	0,916	0,906
ARNO	0,888	0,853	0,880	0,851	0,938	0,923

Esse modelo procura simular o ciclo hidrológico através de um conjunto de reservatórios fictícios, os quais são arranjados em função dos extratos do solo da bacia com suas respectivas propriedades de retenção e transferência da água.

Dentre os principais estudos realizados com o Tank Model, vale ressaltar dois. O primeiro refere-se a DINIZ (1994), que, em sua dissertação, auto calibrou e aplicou a bacias de diferentes climas, os modelos SMAP, Tank Model e SWM. Quando da aplicação destes modelos, verificou-se que a performance do segundo modelo iguala-se a dos outros dois. O segundo estudo diz respeito à aplicação desse modelo para a avaliação das potencialidades da bacia do Rio do Peixe, no âmbito do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (SEPLAN, 1996).

O último modelo conceitual concentrado a ser abordado aqui, devido a sua freqüente utilização no Brasil, é o IPH II (TUCCI, 1981 apud SANTOS & MENESES FILHO, 1998). Este modelo, segundo a literatura pesquisada, tem seu uso marcante para a previsão e estudos de cheias em bacias urbanas. O modelo é formado por três algoritmos, assim expostos (SANTOS & MENESES FILHO, 1998):

1. Consideração das perdas por interceptação e evaporação, através de uma relação entre a evaporação potencial e a umidade do solo;
2. Separação do escoamento, através da aplicação da equação da continuidade à parcela correspondente à camada superior do solo. Determinação da infiltração pela equação de Horton, e da percolação por uma relação empírica;
3. Propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo pelo método de Clark, o qual baseia-se no histograma tempo-área e no modelo do reservatório linear simples.

De acordo com TUCCI (1987) o IPH II é um modelo de fácil manejo devido ao reduzido número de parâmetros, que são seis. Ainda com o intuito de facilitar a utilização deste modelo, GERMANO et al. (1998) apresentaram uma estimativa dos seus parâmetros para 28 bacias urbanas de seis cidades brasileiras.

Assim, como se pode constatar, a utilização de modelos conceituais no Brasil é bastante difundida. Isto, se deve às suas estruturas, que, em geral, são simples, à falta de séries fluviométricas extensas, necessárias à grande maioria dos estudos em recursos hídricos. Porém, também deve-se notar que tais modelos não levam em consideração, explicitamente, a variabilidade espacial das características que influenciam na geração de escoamentos superficiais. Entre estas, pode-se citar as informações topográficas, pedológicas, geológicas, de cobertura vegetal (uso do solo), e, principalmente, as relativas à precipitação. É com a pretensão de se utilizar todas estas informações, para a realização da simulação do ciclo hidrológico, que se desenvolvem os modelos hidrológicos distribuídos. Esta classe de modelos, semelhante aos concentrados, tem como principal finalidade a transformação de

chuva em vazão sendo que, na estrutura dos modelos distribuídos, a variabilidade das informações é, explicitamente, levada em consideração.

De acordo com a literatura, um dos primeiros modelos hidrológicos distribuídos a ser utilizado no Brasil foi o SIMMEQ (DNAEE, 1983b). O SIMMEQ foi implantado na bacia do Rio Paraíba do Sul, a qual drena água de três Estados do Brasil: São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais; ela tem uma área de aproximadamente 55.325,00 km². Esta bacia foi escolhida em função da significativa ocorrência de conflitos devido aos múltiplos usos de seus recursos hídricos. Este estudo foi realizado no âmbito de um convênio firmado entre o Departamento de Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), através da Divisão de Controle de Recursos Hídricos, e o CNPq, em cooperação com a ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer).

Através desse modelo, pode-se simular, espacial e temporalmente, os deflúvios de um conjunto de bacias, a partir dos dados de precipitação, das características fisiográficas e das regras de operação dos aproveitamentos hidráulicos existentes. (CEOTO et al., 1983). Ainda, segundo CEOTO (1983) os principais objetivos do SIMMEQ são:

- Avaliação da viabilidade de projetos de barragens, derivações e transferências de água para outra bacia;
- Controle da qualidade dos dados básicos;
- Elaboração de séries fictícias de dados em sub-bacias não equipadas com postos de medição;
- Reconhecimento das alterações do regime hidrológico, tais como ações intensivas de desmatamento ou reflorestamento e planificação do uso do solo.

O SIMMEQ encontra-se fundamentado na realização da modelação chuva-deflúvio, em malhas quadradas, através de um conjunto de quatro reservatórios. Segundo CEOTO (1983), os dois conceitos fundamentais que orientam o desenvolvimento do modelo são:

- A discretização espacial da bacia hidrográfica;
- A representação matemática das diferentes etapas do ciclo hidrológico.

Ainda apresenta aqui alguns detalhes da aplicação do SIMMEQ à bacia do Rio Paraíba do Sul. Como já foi dito, esta bacia drena água de três Estados do Brasil, de forma que seus recursos hídricos estão em constantes e conflitantes usos, citando-se, como exemplo, o abastecimento de água da região metropolitana do Rio de Janeiro; grande número de indústrias potencialmente poluidoras; geração de energia e irrigações expressivas. Dessa maneira, nota-se o quanto é importante o perfeito conhecimento das características hidrológicas desta bacia.

A caracterização fisiográfica da bacia foi realizada, considerando os seguintes usos de tipos de solo:

1. Pântanos ou culturas de alagados;
2. Florestas;
3. Campos (vegetação natural não florestal);
4. Culturas permanentes ou temporárias;
5. Zonas sedimentares;
6. Concentração urbana;
7. Superfície livre de água.

Foram utilizados 70 postos pluviométricos para a determinação das zonas de pluviometria consideradas homogêneas, através do método de Thiessen. Para a espacialização da evapotranspiração potencial, utilizou-se um total de 19 postos. Também foram caracterizadas as grandes obras hidráulicas, e também, em geral, utilizadas para a geração de energia elétrica; as pequenas barragens; as áreas irrigadas e os sistemas de abastecimento das cidades (DNAEE, 1983b).

Dentre os principais resultados obtidos, quatro merecem destaque:

1. Vazões calculadas, relativas à simulação da situação real, considerando-se a caracterização fisiográfica existente e a influência dos aproveitamentos hídricos. Estas se mostraram, de uma forma geral, excelentes, visto que, em termos de volumes totais escoados, as variações percentuais situaram-se na maior parte, entre 0 e 6%;
2. Vazões naturais geradas, relativas à simulação sem que fossem consideradas as represas e transferências de água. Tal aplicação

- objetivou o conhecimento do comportamento da bacia, sem a presença de obras hidráulicas que afetam o regime hidrológico;
3. Vazões calculadas com base no macro-zoneamento proposto pelo Comitê Executivo de Estudos Integrados da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEEIVAP). A principal finalidade desta aplicação foi simular as condições de uso do solo, de forma a fornecer parâmetros para avaliação do impacto decorrente dessas mudanças;
 4. Vazões calculadas com alterações na caracterização fisiográfica. Dois estudos foram desenvolvidos, a título de ilustração, objetivando a verificação das variações do comportamento da bacia. No primeiro, considerou-se uma situação de grande permeabilidade, cobertura vegetal densa e conseqüente retenção de água no solo. Na segunda etapa, foi simulado o caso inverso, grande impermeabilização e pequena retenção, situação semelhante à existente em regiões urbanizadas. Os resultados demonstraram grandes variações, o que denota a influência da fisiografia nos valores finais de descarga (DNAE, 1983b).

Como se pode verificou, a aplicação desse modelo a bacias hidrográficas possibilita uma série de avaliações que não seriam possíveis quando da utilização de modelos concentrados, uma vez que estes não consideram as informações espacializadas. Para consideração das informações espacializadas faz-se necessário discretizar a bacia hidrográfica. Segundo RIGHETTO (1998), um modelo hidrológico de transformação chuva-deflúvio é do tipo distribuído quando a bacia hidrográfica é subdividida em células. Estas células são de fundamental importância para os modelos hidrológicos distribuídos, pois nelas são caracterizadas as informações que influenciam na geração dos deflúvios. Em cada uma das células se realiza a simulação do ciclo hidrológico.

FIGUEIREDO et al. (1998) apresentaram um estudo no qual verificou-se a influência da discretização da bacia (formação de células) no escoamento simulado através do modelo distribuído, o NAVMO. O modelo

NAVMO foi desenvolvido no Instituto de Recursos Hídricos da Universidade de Bundeswehr, Munique, Alemanha. (KLEEBERG et al. apud FIGUEIREDO, 1998). Este modelo discretiza a bacia em sub-bacias, onde a precipitação é transformada em escoamento total. A vazão total é formada pelas componentes do escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo, os quais são simulados por um sistema formado por dois reservatórios. O método do SCS é utilizado para avaliar o armazenamento de água nestes dois reservatórios.

Para este estudo, foi utilizada a bacia do Rio Piancó, com uma área de 4.550,00 km² e localizada na região semi-árida do Estado da Paraíba. A princípio, realizou-se a calibração para a bacia, dividida em 28 sub-bacias e, com os parâmetros determinados nesta fase, foi realizada duas novas simulações, uma com a bacia dividida em 26 sub-bacias e outra, dividida em 15 sub-bacias. Assim, a partir da análise numérica dos picos e dos volumes apresentados na tabela 2.3, pode-se verificar que não há variações significativas entre esses valores, face a magnitude das vazões de picos e dos volumes escoados. Dessa forma, a principal conclusão deste estudo é que é pequeno o efeito da discretização da bacia sobre os parâmetros dos hidrograma simulados, para as três condições de discretização apresentadas.

TABELA 2.3 – Picos e volumes simulados com diferentes discretizações

Ano	Sub-bacias	Pico (m ³ /s)	Vol (m ³ x 10 ⁶)
1964	15	708,6	1083,0
	26	672,5	1025,0
	28	645,6	993,4
1973	15	539,0	772,0
	26	554,5	762,0
	28	543,7	754,0
1975	15	346,0	706,0
	26	344,0	694,0
	28	340,5	692,7

Ainda sobre a questão da espacialização das informações, pode-se citar um estudo desenvolvido por SILVEIRA & DESBORDES (1999), que

apresentaram um modelo hidrológico distribuído com poucos parâmetros, com o objetivo de realizar as seguintes análises:

- Contribuição relativa das superfícies permeáveis suburbanas comparada com a contribuição das áreas urbanas;
- Verificação da qualidade da reprodução dos hidrogramas de cheia por mecanismos simples de translação e armazenamento na bacia;
- Verificação da importância da distribuição espacial da precipitação na simulação dos hidrogramas.

Esse foi o primeiro modelo distribuído desenvolvido para estudar a bacia do Dilúvio, localizada em Porto Alegre / RS, com uma área de 80 km². Tal modelo foi concebido para esta bacia com o intuito de buscar novas informações que só poderiam ser conseguidas através do uso da variabilidade espacial de dados. Neste modelo, a representação da bacia hidrográfica, neste modelo, é feita por meio de uma malha com células quadradas, as quais representam a bacia e possibilitam o detalhamento espacial, através de planos de informação, sendo considerados os seguintes planos:

- Plano de drenagem;
- Plano de topografia;
- Plano de ocupação do solo;
- Plano de taxas de impermeabilização;
- Plano de isoietas.

O modelo foi desenvolvido com 3 parâmetros e gera, automaticamente, um histograma tempo-área não linear (para a precipitação média), ao aceitar a entrada distribuída da precipitação. O processo de transferência se completa com o modelo do reservatório linear simples a fim considerar os efeitos do armazenamento temporário do escoamento. A produção hídrica é distribuída pela realização da separação dos escoamentos pixel a pixel nas áreas urbanas, considerando as taxas de impermeabilização. Nas áreas suburbanas foi aplicada uma capacidade de infiltração do solo.

Dentre os vários resultados apresentados pelos autores, dois merecem ser comentados, pelo fato de estudar a questão da distribuição espacial da precipitação:

1. Simulação com chuva uniforme e espacialmente distribuída:

Esta simulação permitiu realizar uma comparação entre o que é proposto pelo modelo, o qual considera a variabilidade espacial da precipitação, e o caso de se considerar a chuva uniformemente distribuída no espaço. Através da análise clássica da função objetivo (eq. 2.1) de NASH & SUTCLIFFE (1970) apud SILVEIRA & DESBORDES (1999), observou-se que os resultados para a função objetivo, tanto para a chuva distribuída como para a chuva uniforme, foram bastante próximas. Os conjuntos de parâmetros ajustados para os dois casos também foram semelhantes.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^{om})^2} \quad (2.1)$$

Segundo os autores, isto ocorreu pelo fato da chuva efetiva na bacia estudada ter sido freqüentemente semelhante nas áreas urbanas e rurais, mascarando a não linearidade da translação. Isto se deve ao fato de que a chuva bruta não variou muito no espaço, e, também, porque o coeficiente de escoamento das áreas rurais é muito semelhante à taxa de impermeabilização das áreas urbanas.

2. Simulação com chuva definida pontualmente:

Esta simulação objetiva representar um caso típico de bacias urbanas, em que, geralmente, dispõe-se apenas, de um pluviógrafo, caracterizando assim uma situação de conhecimento restrito da precipitação espacial, o que compromete a performance de modelos concentrados ou distribuídos. O modelo, foi, então, aplicado com apenas um dos postos utilizados nas etapas anteriores. Como era esperado, os resultados, em geral, foram piores do que nos casos em que se utilizaram todos os postos disponíveis, mostrando, assim, a necessidade de se considerar a variabilidade espacial da precipitação.

A partir desse modelo, notou-se o quanto a modelagem distribuída é promissora na simulação de escoamentos urbanos com o uso da variabilidade espacial das informações.

Pelas informações colhidas, da literatura pesquisada, nota-se um expressivo número de trabalhos com o objetivo de conseguir facilitar o uso dos modelos hidrológicos distribuídos, através da utilização conjunta destes com os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's). Para a simulação do ciclo hidrológico com esta classe de modelos, requer-se a manipulação de uma grande quantidade de informações, no tempo e no espaço. Grande parte das ferramentas dos SIG's servem para facilitar a entrada de dados e formação dos arquivos necessários à modelagem; como exemplo, pode-se citar a questão da superposição de mapas para a formação de outros mapas.

MENDES (1996) apresentou os fundamentos para a integração de modelos hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas. Segundo WALLING (1983) apud MENDES (1996), existem muitas críticas com relação ao uso de modelos concentrados como forma de representar os processos hidrológicos. Há uma simplificação enorme ao se considerar a variabilidade espacial com sendo um valor médio. Já a utilização de modelos distribuídos seria uma tentativa de melhor adequar os problemas de escala à modelagem hidrológica, uma vez que estes subdividem a bacia em células, permitindo representar a variação temporal e espacial do sistema físico.

Segundo MENDES (1996) muitos sistemas concentrados continuam sendo utilizados; através da análise de seus resultados, observa-se que:

- A distribuição espacial dos dados necessários ao modelo é bastante variável, sendo que a substituição por valores médios repercute em forte simplificação;
- Problema de variação espacial dos dados se agrava com o aumento das dimensões do sistema em estudo.

Para minimizar esses problemas, pode-se utilizar a modelagem distribuída, porém, surgem outros problemas tais como a aquisição, manutenção e utilização grande quantidades de dados referenciados geograficamente. E é neste

contexto que a utilização integrada de SIG's e modelos distribuídos é importante, uma vez que por meio dos SIG's pode-se facilitar enormemente a manipulação e formação de banco de dados necessários à modelagem.

Por essa razão, buscam-se neste trabalho os vários aspectos de utilização deste conjunto de ferramentas, abordando-se o desenvolvimento e aplicação de modelo hidrológico conjuntamente com técnicas de SIG's. Antes de se chegar a etapa de simulação do ciclo hidrológico as seguintes etapas preliminares devem ser executadas:

- Obtenção de dados de entrada para o modelo, precipitação, temperatura, mapa de solos e imagem de satélite LANDSAT-TM5 com as bandas 3/4/5;
- Processamento e análise dos dados de entrada. Esta etapa consiste basicamente na digitalização, interpolação e rasterização dos dados;
- Operações em SIG, já que em algumas das estruturas anteriores tornaram-se necessárias determinadas operações para a preparação dos dados; dentre as várias operações realizadas pode-se citar, como exemplo, a reclassificação da grade de uso do solo para obtenção de superfícies dos coeficientes de cultivo (K_c) e profundidade do sistema radicular (H).

Após a realização dessas etapas, passa-se para a fase de simulação hidrológica, realizada para cada célula, através do balanço hídrico mensal, segundo ALLEY (1984) apud MENDES (1996). Os resultados dessa simulação geram informações na forma de mapas, representando a variabilidade espacial e temporal dos processos envolvidos. Assim, pode-se aproveitar os resultados para obter uma identificação de áreas com maiores demanda de água para irrigação, entre outras possíveis aplicações. Desta maneira, constata-se o quanto este tipo de sistema integrado é útil, pois através dele pode-se facilitar a identificação de problemas, bem como suas soluções, por meio de imagens.

Outro estudo mostrando que a integração de modelos distribuídos com ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento torna-se bastante

adequados, principalmente, para uma melhor representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, foi apresentado por ARAÚJO FILHO & MOURA (1998). Nesse estudo, procurou-se modelar o ciclo hidrológico de bacias do semi-árido Nordeste através da técnica apresentada anteriormente. O modelo OMEGA (ARAÚJO FILHO, 1992; ARAÚJO FILHO & MOURA, 1998) utilizado é do tipo distribuído e incorpora uma forte conceituação física dos processos hidrológicos. Tal classe de modelos é uma das que mais necessita de dados de entrada, devido a sua conceitualização física. Para esse caso foi necessário a utilização do sensoriamento remoto e do geoprocessamento para realizar o processamento de tais informações. Esse modelo foi aplicado a um sistema de controle e previsão de cheias do rio Capibaribe, localizado no Estado de Pernambuco, demonstrando o quanto é consistente a utilização conjunta de modelos e SIG's.

2.4 – Aplicações anteriores do AÇUMOD

O modelo distribuído AÇUMOD vem sendo aplicado com sucesso em bacias hidrográficas do Estado da Paraíba. A primeira bacia para qual o modelo foi implantado, foi a bacia do Rio do Peixe, com uma área de 3.475 km² e localizada numa região semi-árida da Paraíba. Esta região apresenta um regime pluviométrico caracterizado por precipitações do tipo convectivo, ou seja, grande intensidade pluviométrica num curto espaço de tempo e localização espacial restrita ou concentrada em pontos. Daí a necessidade de se levar em conta a variabilidade espacial e temporal das chuvas.

Para que fosse realizado a discretização da bacia optou-se, neste modelo, por quadriculas de 5 km de lado, as quais após o processo de eliminação e subdivisão, totalizaram 358 quadriculas. Em função das características fisiográficas da bacia consideraram-se quatro funções de produção (zonas hidrologicamente homogêneas):

1. Açude – Esta zona deve ser obrigatoriamente implantada, pois representa os reservatórios, permitindo assim, a obtenção do balanço hídrico nos reservatórios, localizados em quadriculas;
2. Aluvião – Esta zona é formada pelos Aluvissolos Eutróficos, os quais captam ou absorvem a água durante as estações chuvosas. Em geral, esta zona é pertinente das proximidades dos rios;
3. Solos rasos e inclinados – Formada pelos solos do tipo Litossolos (Re), que em geral encontram-se localizados nas cabeceiras da bacia e das sub-bacias. Estes solos foram levados em conta devido a sua influencia na formação rápida de escoamento superficial e ao pequeno potencial de infiltração. Encontram-se embasados por rochas cristalinas, que impossibilitam o escoamento de base;
4. Demais tipos de solos – Grupo forma pelos de profundidade variável, que também encontram-se assentados sobre o cristalino.

A estrutura hidráulica foi formada por 45 açudes, entre os de ordem 1, que localizam-se nas cabeceiras e não têm retiradas significativas, e os de ordem 2, que inclui os postos fluviométricos, captações ao longo do rio e os reservatórios que recebem contribuições de outros, além de terem suas águas utilizadas para diversas finalidades (usos múltiplos). Os açudes de ordem 2 tiveram suas retiradas e restituições detalhadas mensalmente, uma vez que o modelo distribuído AÇUMOD além de simular o ciclo hidrológico, realiza o balanço hídrico dos açudes da bacia, considerando suas respectivas regras de operação.

Os dados climatológicos foram compostos por dados de precipitação diária de 15 postos, compreendidos no período de 1985 a 1991, e por dados de evapotranspiração potencial calculadas a partir dos dados de evaporação do Tanque Classe A, afetados de um coeficiente de tanque igual a 0,8. Para cada quadricula, através do polígono de Thiessen, atribui-se o posto pluviométrico de influência. A mesma metodologia foi utilizada para os dados de evapotranspiração potencial.

Segundo PASSERAT DE SILANS et al. (1999), o AÇUMOD mostrou-se bastante adequado para a geração de vazões no semi-árido. Através da comparação gráfica (hidrograma) e numérica (coeficiente de correlação e erro médio

quadrático), tanto para a calibração como para a validação, pôde-se ver a boa qualidade dos resultados, por exemplo, os valores do coeficiente de correlação determinados estavam acima de 90%. Vale também salientar, que o término da construção do maior açude da bacia hidrográfica, com uma capacidade de 80,2 milhões de m³, se deu no meio do período de calibração, que foi do ano de 1985 a 1991, de forma que a partir desta data observou-se a influencia da operação deste açude nas medições do posto fluviométrico a jusante do açude, utilizado para a calibração, ficando assim, evidente que o balanço hídrico dos açudes incorporado ao modelo de geração de vazões apresentou bons resultados.

A bacia do Rio Taperoá foi a segunda bacia hidrográfica em que se implantou o AÇUMOD; esta bacia encontra-se localizada na região semi-árida Paraibana e tem uma área de 5.667 km². Esta bacia caracteriza-se por uma forte concentração temporal da precipitação, no período de dois a quatro meses, sendo que esta pluviosidade corresponde a 65% da pluviosidade anual. Assim, tem-se uma rede de drenagem caracterizada por um sistema intermitente e cortada por barragens, que têm a finalidade de armazenarem a água, basicamente, para o abastecimento humano, nos períodos de estiagem.

Segundo PAIVA et al. (1999), para a aplicação do AÇUMOD a esta bacia foram considerados 28 elementos de estruturas hidráulicas, sendo 15 açudes de ordem 2, 2 em projeto, 10 exutórios de sub-bacias e 1 posto fluviométrico. As características climatológicas foram representadas a partir de um conjunto de 17 postos pluviométricos, para os quais definiram-se as zonas pluviométricas homogêneas pelo método de Thiessen, e para a evapotranspiração potencial, foram utilizados os dados de evaporação do tanque classe "A", com coeficiente de tanque igual a 0,70. A geologia, pedologia e uso do solo foram representados através de 5 zonas hidrológicas homogêneas, classificadas segundo o tipo de escoamento: solos rasos (afloramento de rochas); solos de escoamento superficial elevado (Solonetz, Solodizados e Solódicos); solos de escoamento superficial médio (Brunos não-calcicos, Podzólicos com textura argilosa e Cambissolos com textura argilosa); solos de escoamento superficial fraco (Arenosos, Regossolos, Latossolos, Podzólicos com textura arenosa e Cambissolos com textura média) e aluviões.

Ainda segundo PAIVA et al. (1999) uma das vantagens do AÇUMOD está na sua calibração, pois é possível tirar proveito da distribuição espacial dos açudes e postos fluviométricos, juntamente com o mapa das zonas hidrológicas homogêneas, e assim calibrar os parâmetros do modelo. Isto tudo é apresentado nos bons resultados encontrados durante a calibração e validação do modelo para a bacia do Rio Taperoá. Segundo os autores, os bons resultados também se devem à incorporação do balanço hídrico dos açudes ao AÇUMOD.

3.0 – A BACIA HIDROGRÁFICA SIMULADA

A princípio seria modelada a bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, mas devido à grande extensão de sua área, o que diretamente sugere também numa grande quantidade de dados necessários a sua simulação. Desta forma preferiu-se optar por simular uma das sub-bacias do Rio Piranhas-Açu. Assim, foi escolhida a bacia hidrográfica do Rio do Peixe, a qual já contava com uma grande parte das suas informações levantadas e tratadas pelo Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado para Paraíba (PDRH-PB), em 1996.

3.1 – Localização

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe que tem uma área de drenagem igual a 3.475,74 km², encontra-se entre os paralelos de 6° 20' e 7° 06' e os meridianos de 37° 57' e 38° 46', localizando-se a Noroeste do Estado da Paraíba (Figura 3.1), na região do Sertão paraibano. Na bacia hidrográfica do Rio do Peixe encontram-se um total de 17 municípios, sendo que algum deles encontram-se totalmente inseridos na bacia e outros não (Figura 3.2).

9.300 km

9.220 km

525 km

615 km

LEGENDA

- SEDE DE MUNICÍPIO
- LIMITE DA BACIA
- LIMITE DE MUNICÍPIO

ESCALA GRÁFICA
0 10km

FIGURA 3.2 - Localização dos municípios da bacia hidrográfica do rio do Peixe

3.2 – Características fisiográficas

Uma caracterização fisiográfica da bacia do Rio do Peixe foi realizada no âmbito do PDRH-PB (SEPLAN, 1996), tal estudo desenvolveu-se a partir de cartas plani-altimétricas na escala 1:100.000. Deste estudo tem-se os seguintes parâmetros:

➤ Área de drenagem	3.475,74 km ²
➤ Perímetro da bacia	370,80 km
➤ Comprimento do rio principal	106,10 km
➤ Fator de forma	0,31
➤ Coeficiente de compacidade	1,76
➤ Desnível específico	99,06

Tais parâmetros são indicativos de que:

- A bacia tem uma forma ligeiramente alongada, relativamente compacta e regular, o que quer dizer que esta bacia estaria sujeita a cheias intensas, porém de curta duração;
- Seu relevo, segundo classificação proposta por DUBREUIL (1966), varia entre: relevo ondulado, relevo forte e relevo bastante forte.

3.3 – Características geológicas, pedológicas e de cobertura vegetal

Do ponto de vista geológico, a bacia do Rio do Peixe é formada por dois grandes compartimentos geológicos, o primeiro correspondendo às rochas cristalofílicas do Complexo Gnáissico-Magmático e o segundo às rochas diversas da sequência sedimentar do Grupo Rio do Peixe. Esses dois grupos litológicos perfazem cerca de 70% da área da bacia, sendo os outros 30% formados por rochas aflorantes (Figura 3.3).

Com relação a distribuição espacial da pedologia da bacia observa-se as seguintes características: a Oeste tem-se uma maior concentração de Aluviosolos e Vertissolos, a Leste predominam os Litossolos seguidos de ocorrências de Podzólicos e Bruno Não Cálcicos, já ao Norte da bacia tem-se os Podzólicos, Bruno Não Cálcicos e Aluvissolos, estes em menor proporção (Figura 3.4).

Sobre a cobertura vegetal da bacia pode-se ver que a ação antrópica na bacia tem um índice elevado, chegando a um total de 85% da área da bacia. Os 15% restantes são formados pela Caatinga, que pode ser do tipo Arbustiva Arbórea aberta, Arbustiva Arbórea fechada e Arbórea fechada (Figura 3.5).

9.300 km

9.220 km

525 km

615 km

LEGENDA

— LIMITE DA BACIA

• SEDE DE DISTRITO

● SEDE DE MUNICÍPIO

■ SEDE DE MUNICÍPIO

■ ALUVIÕES

QUATERNÁRIO

GRUPO RIO DO PEIXE

CRETÁCIO INFERIOR

FORMAÇÃO SOUZA: FOLHELHOS E SILTITOS COM NÍVEIS DE CONGLOMERADOS E ARENITOS

FORMAÇÃO ANTENOR NAVARRO: CONGLOMERADOS, BRECHAS E ARENITOS GROSSIROS COM INTERCALAÇÕES DE SILTITOS E FOLHELHOS

PRÉ-CAMBRIANO INFERIOR

COMPLEXO GNAISSICO-MIGMATICO, INCLUINDO CALCÁRIO CRISTALINO, ROCHAS GRANÍTICAS, ETC

FALHA INVERSA

FALHA TRANSCORRENTE

ESCALA GRÁFICA
0 10km

NM

FIGURA 3.3 - Mapa Geológico da bacia do rio do Peixe

FIGURA 3.5 - Mapa da cobertura vegetal da bacia do rio do Peixe

3.4 – Características climatológicas

O tratamento deste item não é muito simples, visto que há uma enorme escassez de dados climatológicos nesta bacia, excetuando-se os dados de precipitações. Assim, a análise climatológica da bacia foi realizada através das estações climáticas de São Gonçalo (Sousa) e Coremas, que apesar de não encontrarem-se no interior da bacia são representativos dos processos climatológicos da bacia estudada.

A bacia do Rio do Peixe caracteriza-se por duas regiões climáticas distintas, na região Norte, Leste e Noroeste tem-se um clima seco (Xerófito), do tipo estepe, o qual tem sua estação seca coincidindo com o inverno e apresenta uma temperatura mensal superior a 18°C durante todo o ano. Já na parte Sul e Sudeste da bacia o clima é do tipo tropical úmido com um inverno seco e com uma variação mínima da temperatura média mensal. De uma maneira geral a amplitude térmica das médias mensais é da ordem de 4°C , sendo que nos meses de junho e julho tem-se as temperaturas mais baixas, em torno de 25°C , e no final e início do ano tem-se as temperaturas mais altas por volta dos $28,5^{\circ}\text{C}$.

A característica climatológica que exerce uma forte influência sobre todo o ciclo hidrológico da bacia é a evaporação. Tal característica é influenciada pela temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Nas estações citadas anteriormente a evaporação é medida em evaporímetros do tipo tanque classe A, na tabela 3.1 tem-se os valores médios mensais, como pode-se ver a taxa de evaporação anual tem um valor muito alto, em torno dos 3000 mm/ano.

TABELA 3.1 - Evaporação Média Mensal do Tanque Classe A (mm).

Posto	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dcz	Anual
S. Gonçalo	300,7	213,9	195,5	170,0	183,1	176,0	216,4	274,8	315,1	344,7	333,9	332,5	3056,6
Coremas	272,3	215,4	204,1	182,4	183,1	182,2	219,9	271,9	299,6	332,9	319,0	310,6	2993,4

Outra característica climatológica importante é a evapotranspiração potencial a qual pode ser determinada a partir de fórmulas que levam em consideração os dados climatológicos, para tanto tem-se as fórmulas desenvolvidas

por: Penman (1979), Blaney-Criddle (1952), Thornthwaite (1965) e Hargreaves (1985). Para a bacia em estudo a evapotranspiração foi determinada utilizando-se os dados de evaporação do tanque Classe A, multiplicados por um coeficiente de tanque igual 0,8.

3.5 – Regime pluviométrico

Uma análise sobre os dados de precipitação da bacia do Rio do Peixe, os quais são abundantes, permitiu observar uma variabilidade temporal e espacial enorme, fato comum para bacias inseridas na região semi-árida.

Nesta bacia, 67% da precipitação anual encontra-se concentrada nos meses de fevereiro, março e abril. Sua precipitação média tem um valor aproximado de 880 mm/ano. A espacialização da precipitação na bacia foi realizada a partir de 11 postos pluviométricos, listados na tabela 3.2. Na figura 3.6 tem-se as 11 áreas de influência de cada posto, determinadas pelo método de Thiessen.

Para a simulação foram utilizados dados diários destes 11 postos pluviométricos, os quais têm seus dados compreendidos em 2 períodos, de janeiro de 1962 a dezembro de 1989 e de janeiro de 1994 a dezembro de 1999. Como pode-se ver, há a uma inexistência de dados para o período que vai de janeiro de 1990 a dezembro de 1993, a escassez de dados para este intervalo de tempo é tal que torna-se impossível a utilização de qualquer método de reconstituição de dados pluviométricos.

TABELA 3.2 – Postos pluviométrico utilizados no estudo.

Código	Latitude (km)	Longitude (km)	Altitude (m)	Coef. De Thiessen	Nome do Posto
3832089	9.277,8	547,9	500,0	0,123	Barra do Juá
3833554	9.253,8	584,7	200,0	0,084	Sousa
3833413	9.255,7	560,8	240,0	0,132	Ant. Navarro
3832789	9.239,1	547,9	291,0	0,207	Cajazeiras
3833639	9.244,6	575,5	235,0	0,031	São Gonçalo
3843202	9.213,3	555,2	185,0	0,011	São J. de Piranhas
3833835	9.235,4	573,7	265,0	0,010	Nazarezinho
3833588	9.251,9	603,1	170,0	0,108	Aparecida
3833018	9.279,6	564,5	300,0	0,115	Uiraúna
3833235	9.268,6	573,7	420,0	0,150	São Vicente
3834137	9.275,8	630,8	215,0	0,027	Jerico

FIGURA 3.6 – Espacialização da precipitação pelo método de Thiessen.

3.6 – O regime fluviométrico

Os dados fluviométricos podem ser vistos como a resposta hidrológica às precipitações, sendo esta resposta fortemente influenciada pelas características fisiográficas, pedológicas, geológicas, climatológicas entre outras.

Na bacia do Rio do Peixe a fluviometria é realizada, atualmente, em dois postos fluviométricos, o posto Antenor Navarro (código 3726000) e o posto Aparecida (código 3729000) (Figura 3.7), os quais têm seus próprios períodos de observação. O grande problema destes dados está na qualidade, uma vez que estas medições encontram-se influenciadas pela construção de açudes a montante destes postos, acarretando assim em medições perturbadas pela operação destes açudes.

Os valores de vazões observadas, para estes postos, encontram-se nas tabelas 3.3, 3.4 e 3.5. Nos gráficos 3.1, 3.2 e 3.3, pode-se melhor analisar a distribuição temporal destes valores, ficando evidente a concentração de vazões em um determinado período do ano, bem como a grande quantidade de meses com vazões nulas.

TABELA 3.3 - Médias mensais de descarga no posto Antenor Navarro (m^3/s), primeiro período.

MES/ ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1963	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1964	0	1,76	0	0	0	1,43	0,01	0	0	0	0	0
1965	0,08	0	0,09	22	12,1	0,41	0	0	0	0	0	0
1966	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1967	0	2,99	4	44,9	44,9	0,38	0	0	0	0	0	0
1968	0	0	28,6	0,7	4,66	0,05	0	0	0	0	0	0
1969	0	0	1,1	28,1	0,6	0,31	0	0	0	0	0	0
1970	0	0	7,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1971	1,29	1,03	2,26	3,08	0,02	0,26	0	0	0	0	0	0
1972	0,37	0,63	3,45	0,14	0	0,06	0	0	0	0	0	0,22

TABELA 3.4 – Médias mensais de descargas no posto Antenor Navarro (m³/s), segundo período.

MES/ ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1984	-99,0	-99,0	-99,0	-99,0	0,86	2,21	1,57	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
1985	2,44	46,02	30,75	97,46	66,55	4,67	2,71	2,09	1,48	0,34	0,01	0,00
1986	0,00	0,00	4,57	10,76	1,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1987	0,00	13,29	34,21	8,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1988	0,00	0,00	25,05	2,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1989	0,00	0,00	0,19	49,76	41,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1990	1,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1991	6,35	0,00	9,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1992	4,94	3,41	3,01	9,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1993	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1994	2,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1995	0,00	0,00	0,00	0,83	1,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1996	0,00	0,00	0,00	0,42	7,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1997	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

* -99,0 – Mês sem medição de descarga.

TABELA 3.5 - Médias mensais de descarga no posto Aparecida (m³/s).

MES/ ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1985	5,23	117	64,1	359	200	12,5	3,55	0,79	0	0	0	0
1986	0,19	1,47	33,8	50,6	21	2,74	0,68	0,2	0,12	0,28	0,01	0
1987	0	10,7	57,4	25,5	3,34	0,22	0,05	0,18	0	0	0	0,04
1988	1,2	1,51	30,1	67,7	6,78	0,22	0	0	0,15	0,24	0,27	0,61
1989	1,52	0,08	7,17	154	74,8	3,01	1,37	0	0,2	0,45	0,38	15,7
1990	6,01	0,87	2,19	4,3	4,14	0	0,15	0,32	0,05	0,06	0,19	0,19
1991	9,29	4,82	8,5	8,31	20,5	0,57	0,17	0,16	0,07	0,02	0,05	0,05
1992	8,96	35,5	10,5	39,7	0,07	0	0,12	0	0	0	0	0
1993	0	1,27	3,75	0,28	2,09	0	0	0	0	0	0	0
1994	10,2	2,64	0,68	0,16	0,08	4,03	3,35	0	0	0	0	0,18
1995	0,06	0,24	6,71	18,94	53,46	6,27	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
1996	3,53	7,30	9,36	35,86	67,99	0,98	0,15	0,09	0,02	0,02	0,14	0,00
1997	11,91	5,55	9,83	11,87	5,65	0,12	0,08	0,04	0,25	0,00	0,21	0,12

GRÁFICO 3.1 – Hidrograma do posto Antenor Navarro, primeiro período.

GRÁFICO 3.2 – Hidrograma do posto Antenor Navarro, segundo período.

GRÁFICO 3.3 – Hidrograma do posto Aparecida

3.7 – Os reservatórios superficiais

Um fator que modifica significativamente o comportamento hidráulico e hidrológico da bacia hidrográfica é a existência de açudes. Durante os estudos do PDRH-PB (SEPLAN, 1996) foram totalizados, a partir de imagens de satélite, 726 açudes de vários tamanhos, sendo os de pequeno porte mais numerosos.

Para a simulação do ciclo hidrológico da bacia do Rio do Peixe foram utilizados os principais açudes, em tamanho e significância quanto ao seu uso. No anexo 2 encontram-se as fichas com as principais informações sobre os 15 açudes utilizados na simulação. Valendo salientar que, nem todos os açudes têm informações sobre suas curvas cota/área/volume, assim estas foram estimadas através de curvas do tipo ($V = k.h^\alpha$; e $A = k.\infty.h$; onde V , representa o volume em m^3 ; h , a altura do reservatório; e A , a área do espelho d'água). Na figura 3.7 tem-se a localização dos principais açudes utilizados para o estudo.

Nem todos os açudes que foram utilizados na calibração tinha dados de níveis; o ideal era que todos tivessem tais dados para que assim se pudesse realizar uma melhor calibração do modelo; em seguida encontram-se os nomes dos açudes que tinham dados limnimétricos:

- Açude Arrojado;
- Açude Lagoa do Arroz.

3.8 – As demandas

A estimativa das demandas para os diversos usos foi realizada objetivando a simulação dos reservatórios da bacia hidrográfica. Devido à diversidade de usos e metodologias para estimativa de cada tipo de demanda este tópico foi dividido em 2 outros: o abastecimento humano e a irrigação. Ainda vale ressaltar que os demais usos não serão aqui abordados, uma vez que as atividades industriais nesta bacia não são significantes, sendo este tipo de uso considerado parte do consumo humano.

3.8.1 – O abastecimento humano

A bacia do Rio do Peixe tem um total de 17 municípios, alguns completamente inseridos na bacia outros apenas parcialmente. A maior parte destes municípios tem suas sedes abastecidas por reservatórios superficiais, que encontram-se no interior da bacia, porém existem municípios que são abastecidos por açudes que estão fora dos limites da bacia ou por poços, como é o caso dos municípios de:

- Cajazeiras – Abastecido pelo açude Eng. Ávidos;
- Sousa – Abastecido pelo açude São Gonçalo;
- Lastro – Abastecido por poço;
- Aparecida – Abastecida por poço;
- Marizópolis – Abastecida por poço.

Para o estudo em questão, o cálculo da demanda hídrica para o abastecimento humano destes municípios não se fez necessário, já que estes não se utilizam dos recursos hídricos superficiais da bacia do Rio do Peixe. Também não foram calculadas as demandas para as populações rurais dos municípios da bacia, pois estes são abastecidos por poços.

Já para os 12 municípios que são abastecidos a partir de algum dos reservatórios superficiais existentes na bacia, que serão simulados mais a frente, foi realizado um estudo de previsão populacional a partir dos dados de população dos CENSOS dos anos de 1970, 1980, 1991 e 1996. Tal estudo consistiu em se determinar qual o melhor modelo matemático de previsão, para tanto foram utilizados os seguintes modelos:

- Equação linear;
- Equação exponencial;
- Equação logarítmica;
- Curva de potência;
- Progressão aritmética;
- Progressão geométrica.

Cada um deste modelos foi aplicado ao conjunto de dados, determinados os parâmetros de cada modelo e calculadas as populações para os

mesmos anos existentes. Assim, com os dados de população observados e calculados por cada modelo, calculou-se o coeficiente de correlação entre os 2 conjuntos de dados e através deste coeficiente escolhia-se o melhor modelo, na tabela 3.6 encontram-se um resumo sobre os resultados da aplicação dos vários modelos aos municípios da bacia hidrográfica.

TABELA 3.6 – Resumo dos resultados do estudo de previsão populacional.

Município	Modelo Matemático	Equação
Bom Jesus	Progressão Geométrica	$P = 259 * (1 + 4,66/100)^{(Tn - 1960)}$
Cachoeira dos Índios	Progressão Geométrica	$P = 1004 * (1 + 4,23/100)^{(Tn - 1960)}$
Cajazeiras	*	*
Lastro	*	*
Santa Cruz	Equação Logarítmica	$P = -1391,54 + 1109,56 * (Tn - 1960)$
Santa Helena	Modelo Linear	$P = 679,77 + 49,48 * (Tn - 1960)$
S. J. do Rio do Peixe	Curva de Potência	$P = 1435,47 * (Tn - 1960)^{0,39}$
Sousa	*	*
Aparecida	*	*
Vierópolis	Equação Logarítmica	$P = 717,85 + 51,12 * \ln(Tn - 1960)$
São Francisco	Equação Logarítmica	$P = 236,14 + 172,33 * \ln(Tn - 1960)$
Uiraúna	Progressão Geométrica	$P = 6206 * (1 + 2,28/100)^{(Tn - 1960)}$
Poço Dantas	Curva de Potência	$P = 669,62 * (Tn - 1960)^{-0,07}$
Marizópolis	*	*
Triunfo	Curva de Potência	$P = 25,45 * (Tn - 1960)^{1,36}$
Santarém	Progressão Geométrica	$P = 1834 * (1 + 2,53/100)^{(Tn - 1960)}$
Poço José de Moura	Modelo Linear	$P = 328,47 + 14,73 * (Tn - 1960)$

* – Cidades abastecidas por mananciais externos a bacia ou por poço.

Com a definição de cada modelo de desenvolvimento da população, para cada município, foram calculadas as populações para os anos intermediários aos que se tinham dados do CENSO do IBGE. Para o ano 2.000, a bacia tem uma população abastecida, por mananciais da própria bacia, de aproximadamente 34.000 habitantes. De posse dos dados de população, para cada ano, procedeu-se com o cálculo da demanda hídrica anual. A determinação da demanda hídrica mensal, que é necessária para a simulação, foi calculada a partir da divisão do valor da demanda hídrica anual por 12 meses, considerando-se constante este valor. A tabela 3.7 apresenta os resultados deste estudo.

TABELA 3.7 – Demandas para o abastecimento humano (em l/s).

Município	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Bom Jesus	0,38	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,52	0,54	0,57	0,59	0,62	0,65	0,68	0,71	0,75
Santa Cruz	2,52	2,57	2,62	2,67	2,71	2,76	2,80	2,84	2,88	2,92	2,96	2,99	3,03	3,06	3,09	3,13
Santa Helena	2,22	2,28	2,33	2,39	2,45	2,50	2,56	2,62	2,68	2,73	2,79	2,85	2,91	2,96	3,02	3,08
S. J. do R. do Peixe	5,83	5,92	6,01	6,09	6,18	6,26	6,34	6,42	6,50	6,57	6,65	6,72	6,79	6,86	6,93	7,00
Triunfo	2,25	2,38	2,50	2,63	2,76	2,89	3,02	3,15	3,29	3,42	3,56	3,70	3,84	3,98	4,13	4,27
São Francisco	0,92	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,01
Uiraúna	8,04	8,22	8,41	8,60	8,80	9,00	9,20	9,41	9,63	9,85	10,07	10,30	10,54	10,78	11,02	11,27
Poço Dantas	0,62	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Santarém	2,41	2,47	2,53	2,59	2,66	2,73	2,79	2,86	2,94	3,01	3,09	3,17	3,25	3,33	3,41	3,50
Poço José de Moura	0,81	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	0,99	1,01	1,03	1,05	1,06
Cachoeira dos Índios	1,43	1,49	1,55	1,62	1,69	1,76	1,83	1,91	1,99	2,08	2,16	2,25	2,35	2,45	2,55	2,66

3.8.2 – A irrigação

Ao contrário da demanda para o abastecimento humano a irrigação tem um valor bastante significativo, para tanto utiliza-se a água disponível em reservatórios superficiais construídos para tal finalidade. A irrigação ainda é também realizada através de captações a fio d'água. A determinação precisa da quantidade de água demandada para tal finalidade, bem como seu histórico, torna-se impossível devido ao fato de não ser comum manter dados arquivados.

Assim, adotou-se uma metodologia que vem sendo utilizada pela SCIENTEC, para se determinar as demandas hídricas mensais para cada tipo de cultivo (PASSERAT DE SILANS, 1998). Tal metodologia baseia-se em informações do Censo Agropecuário da Paraíba, dos anos de 1995/1996 (IBGE, 1998), a partir do qual extraísse as áreas das culturas irrigadas de maior importância, de cada município. Na tabela 3.8 apresentam-se as áreas das principais culturas por município. Saliente-se ainda que, alguns municípios da bacia não tem qualquer tipo de produção agrícola.

A seguir, descreve-se a metodologia utilizada para a estimativa da necessidade hídrica para a irrigação, a qual é realizada em 2 etapas:

I – Necessidade hídrica de irrigação.

A necessidade hídrica de uma cultura depende da variedade cultivada, da natureza, do solo e dos fatores climatológicos (precipitação, umidade relativa do ar, temperatura, etc.). A irrigação vem suprir estas necessidades quando a umidade do solo é insuficiente para realizar tal tarefa. A região em que se encontra a bacia hidrográfica do rio do Peixe caracteriza-se por 2 estações bem distintas: a estação chuvosa e a seca, que vai de maio a dezembro. É neste período seco, em que há a ausência de chuvas, que se precisa de maiores volumes de água para a irrigação. As vezes, pode ocorrer irrigação no período chuvoso, porém como isto é um fato esporádico considerou-se que não houve irrigação em tal período.

II – Necessidade hídrica para a irrigação.

Baseado nestas informações e utilizando as tabelas de coeficientes de cultivos encontradas em GOMES (1997), estabeleceu-se para cada cultivo encontrado na bacia, coeficientes médios mensais de cultivo a partir do primeiro mês do início do período de irrigação.

Na tabela 3.10 são apresentados estes coeficientes. O período de irrigação para a bacia em estudo vai de maio a dezembro.

A partir dos dados de evapotranspiração obtidos na publicação “Dados climatológicos do Nordeste” (SUDENE, 1984), pela fórmula de Hargreaves, determinou-se o valor médio diário da ETP (tabela 3.9). Multiplicando-se estes valores pelos coeficientes de cultivo médios mensais, ajustados temporalmente ao período de irrigação, obtém-se a lâmina mensal para a irrigação, para cada município. (tabela 3.11)

TABELA 3.9 – Evapotranspiração média diária (mm/dia).

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
6,3	5,4	4,3	4,3	4,0	4,0	4,4	5,3	6,0	6,4	6,5	6,6

As necessidades hídricas para a irrigação foram obtidas considerando as áreas irrigadas de cada cultivo de cada município, admitindo-se um rendimento hidráulico médio de 0,6, rendimento este, que leva em conta os diversos fatores de perda d'água

no processo de irrigação. Os resultados encontram-se na tabela 3.12. Ainda na tabela 3.13 tem-se uma estimativa da quantidade de água necessária por hectare, analisando-se estes valores se vê que a metodologia empregada apresenta valores de demandas dentro do que realmente se utiliza para a irrigação, que geralmente é em torno de 15.000 a 20.000 m³/ha/ano.

TABELA 3.10 – Coeficientes médios mensais de cultivos.

Culturas	Mês											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Abacaxi	-	-	-	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Algodão	-	-	-	-	0,45	0,75	1,15	1,15	1,15	0,75	-	-
Arroz	-	-	-	-	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Cana de Açúcar	-	-	-	-	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fava	-	-	-	-	0,70	1,10	0,80	-	-	-	-	-
Feijão	-	-	-	-	0,70	1,10	0,70	-	-	-	-	-
Feijão (2ª safra)	-	-	-	-	-	-	-	0,70	1,10	0,70	-	-
Feijão Verde	-	-	-	-	0,70	1,10	1,00	-	-	-	-	-
Mandioca	-	-	-	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Melancia	-	-	-	-	0,70	1,00	1,00	0,85	-	-	-	-
Melão	-	-	-	-	0,70	1,00	1,00	0,85	-	-	-	-
Milho em grão	-	-	-	-	0,40	0,80	1,15	1,00	-	-	-	-
Milho em espiga	-	-	-	-	0,40	0,80	1,15	1,00	-	-	-	-
Tomate	-	-	-	-	0,75	1,15	1,15	0,80	-	-	-	-
Capim	-	-	-	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Banana	-	-	-	-	0,70	0,90	0,90	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Caju (castanha)	-	-	-	-	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Caju (fruta)	-	-	-	-	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Coco-da-baía	-	-	-	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Laranja	-	-	-	-	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Manga	-	-	-	-	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Goiaba	-	-	-	-	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Graviola	-	-	-	-	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Limão	-	-	-	-	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Mamão	-	-	-	-	0,70	0,90	1,00	1,00	1,00	0,90	-	-
Maracujá	-	-	-	-	0,80	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90
Horticultura	-	-	-	-	0,75	1,15	1,15	1,00	-	-	-	-

TABELA 3.11 – Lâmina mensal para a irrigação (mm/dia).

Culturas	Mês											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Abacaxi	-	-	-	-	3,00	3,00	3,30	3,98	4,50	4,80	4,88	4,95
Algodão	-	-	-	-	1,80	3,00	5,06	6,10	6,90	4,80	0,00	0,00
Arroz	-	-	-	-	4,40	4,40	4,84	5,83	6,60	7,04	7,15	7,26
Cana de Açúcar	-	-	-	-	3,60	3,60	3,96	4,77	5,40	5,76	5,85	5,94
Fava	-	-	-	-	2,80	4,40	3,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feijão	-	-	-	-	2,80	4,40	3,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feijão (2ª safra)	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	3,71	6,60	4,48	0,00	0,00
Feijão Verde	-	-	-	-	2,80	4,40	4,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mandioca	-	-	-	-	4,00	4,00	4,40	5,30	6,00	6,40	6,50	6,60
Melancia	-	-	-	-	2,80	4,00	4,40	4,51	0,00	0,00	0,00	0,00
Melão	-	-	-	-	2,80	4,00	4,40	4,51	0,00	0,00	0,00	0,00
Milho em grão	-	-	-	-	1,60	3,20	5,06	5,30	0,00	0,00	0,00	0,00
Milho em espiga	-	-	-	-	1,60	3,20	5,06	5,30	0,00	0,00	0,00	0,00
Tomate	-	-	-	-	3,00	4,60	5,06	4,24	0,00	0,00	0,00	0,00
Capim	-	-	-	-	4,00	4,00	4,40	5,30	6,00	6,40	6,50	6,60
Banana	-	-	-	-	2,80	3,60	3,96	5,83	6,60	7,04	7,15	7,26
Caju (castanha)	-	-	-	-	2,80	2,80	3,08	3,71	4,20	4,48	4,55	4,62
Caju (fruta)	-	-	-	-	2,80	2,80	3,08	3,71	4,20	4,48	4,55	4,62
Coco-da-baía	-	-	-	-	3,20	3,20	3,52	4,24	4,80	5,12	5,20	5,28
Laranja	-	-	-	-	2,80	2,80	3,08	3,71	4,20	4,48	4,55	4,62
Manga	-	-	-	-	2,80	2,80	3,08	3,71	4,20	4,48	4,55	4,62
Goiaba	-	-	-	-	2,80	2,80	3,08	3,71	4,20	4,48	4,55	4,62
Graviola	-	-	-	-	2,80	2,80	3,08	3,71	4,20	4,48	4,55	4,62
Limão	-	-	-	-	2,80	2,80	3,08	3,71	4,20	4,48	4,55	4,62
Mamão	-	-	-	-	2,80	3,60	4,40	5,30	6,00	5,76	0,00	0,00
Maracujá	-	-	-	-	3,20	3,60	4,40	5,30	6,00	6,40	6,50	5,94
Horticultura	-	-	-	-	3,00	4,60	5,06	5,30	0,00	0,00	0,00	0,00

TABELA 3.12 – Vazões demandas para a irrigação por município (l/s).

Cultura	Mês											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Abacaxi	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Algodão	-	-	-	-	11,11	19,14	31,23	37,62	44,01	29,63	0,00	0,00
Arroz	-	-	-	-	147,69	152,61	162,45	195,68	228,91	236,30	247,99	243,68
Cana-de-açúcar	-	-	-	-	2,08	2,15	2,29	2,76	3,23	3,33	3,50	3,44
Fava	-	-	-	-	12,42	20,17	15,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feijão	-	-	-	-	570,37	926,17	627,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feijão (2.safra)	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feijão verde	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mandioca	-	-	-	-	3,86	3,99	4,24	5,11	5,98	6,17	6,48	6,37
Melancia	-	-	-	-	0,54	0,80	0,85	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Melão	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Milho em grão	-	-	-	-	361,73	747,57	1.143,97	1.198,23	0,00	0,00	0,00	0,00
Milho em espiga	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tomate	-	-	-	-	2,31	3,67	3,90	3,27	0,00	0,00	0,00	0,00
Capim	-	-	-	-	26,23	27,11	28,86	34,76	40,66	41,98	44,05	43,29
Banana	-	-	-	-	17,28	22,96	24,44	35,99	42,10	43,46	45,61	44,81
Cajú (Castanha)	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cajú (Fruta)	-	-	-	-	0,54	0,56	0,59	0,72	0,84	0,86	0,91	0,89
Coco-da-Baía	-	-	-	-	2,47	2,55	2,72	3,27	3,83	3,95	4,15	4,07
Laranja	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Manga	-	-	-	-	2,70	2,79	2,97	3,58	4,19	4,32	4,53	4,46
Goiaba	-	-	-	-	0,54	0,56	0,59	0,72	0,84	0,86	0,91	0,89
Graviola	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Limão	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mamão	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maracujá	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Horticultura	-	-	-	-	1,39	2,20	2,34	2,45	0,00	0,00	0,00	0,00

TABELA 3.13 – Resumo das demandas para a irrigação (em m³/ha/ano).

Município	Ano : 1996
Sousa	18.621,12
Lastro	19.261,26
Santa Cruz	18.220,25
Uiraúna	20.515,59
São J. do Rio do Peixe	19.850,51
Triunfo	20.067,56
Santa Helena	16.589,01
Cajazeiras	19.429,67
Bom Jesus	18.469,80
Cachoeira dos Índios	20.120,79

4.0 – O MODELO DE SIMULAÇÃO CHUVA – VAZÃO

Para o cumprimento dos objetivos propostos por este estudo será utilizado o AÇUMOD (PASSERAT DE SILANS, 1998). Trata-se de um modelo matemático distribuído de transformação de chuva em deflúvio. O modelo é do tipo determinístico distribuído linear. O AÇUMOD foi incorporado ao Sistema de Apoio ao Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos – SAPO – (ALMEIDA et al., 1999). Sua incorporação ao SAPO objetiva facilitar a entrada e manipulação dos dados necessários à simulação do ciclo hidrológico, bem como a análise dos resultados.

A discretização fisiográfica da bacia é realizada a partir de uma malha quadriculada retangular, a qual, inicialmente, cobre toda a área da bacia. Em cada uma destas quadrículas é realizada a simulação do ciclo hidrológico, através de um conjunto de 4 reservatórios (Figura 4.1). Em seguida, a água é encaminhada de quadrícula em quadrícula até chegar ao exutório da bacia.

FIGURA 4.1 – Conjunto de reservatório que simulam o ciclo hidrológico.

Para o conjunto de reservatórios que simulam o ciclo hidrológico definem-se os seguintes parâmetros:

- P – Precipitação corrigida no passo de tempo correspondente, em mm, ou seja, fração da precipitação bruta que será utilizada para gerar o termo $ÁGUA$;

- PM – Precipitação bruta, em mm;
- Qsur – Termo que representa o escoamento superficial direto;
- ÁGUA – Quantidade de água disponível para gerar os escoamentos, em mm;
- ETR – Evapotranspiração real, em mm;
- DR – Variação da quantidade de água no solo, em mm;
- RBA – Reserva útil de água no solo, antes da precipitação, em mm;
- RHA – Reserva útil de água no solo, depois da precipitação, em mm;
- Rmax – Reserva máxima de água no solo, acima do qual nenhuma água é retida no solo, em mm;
- R – Reserva de água ao final de cada passo de tempo, em mm;
- CRT – Nível correspondente à capacidade média de armazenamento de água no solo, em mm;
- DCRT – Capacidade de armazenamento de água no solo, abaixo do qual não há escoamentos, em mm;
- FN – Função de infiltração;
- QR – Escoamento superficial, antes do retardamento no reservatório superficial;
- QI – Escoamento infiltrado, antes do retardamento no reservatório subterrâneo;
- QRmax – Representa o nível transbordamento do reservatório de escoamento superficial, este nível estabelece a divisão entre escoamento puro e retardado.;
- RR – Representam o nível de água no reservatório de escoamento superficial no passo de tempo inicial, em mm;
- QRR1 – Componente que representa o escoamento superficial instantâneo;
- QRR2 – Componente que representa o escoamento superficial retardado em função nível RR;
- QRR – Componente que representa a soma das duas parcelas definidas anteriormente, na verdade representa o escoamento superficial após passar pelo reservatório superficial;

- $Q_{I\max}$ – Representa o nível de transbordamento do reservatório de alimentação do lençol, estabelecendo um retardamento entre a infiltração e a alimentação do lençol.;
- R_{freat} – Representam o nível de água no reservatório subterrâneo no tempo inicial;
- Q_{II1} – Componente que representa o escoamento de base instantâneo;
- Q_{II2} – Componente que representa o escoamento de base retardado em função nível R_{freat} ;
- Q_{II} – Componente que representa a soma das duas parcelas definidas anteriormente, na verdade representa o escoamento infiltrado após passar pelo reservatório subterrâneo;
- Q – Lâmina escoada para uma determinada unidade hidrológica homogênea;

A caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica é realizada, primeiramente, pelas ações de eliminar as quadrículas que não fazem parte da bacia e, depois, pela divisão das quadrículas, de forma a se detalhar melhor as informações da bacia. Por exemplo, aproximar um conjunto de quadrículas a forma irregular das sub-bacias, ou localizar um elemento hidráulico. A quadrícula “mãe” de lado A , só poderá ser sub-dividida em quadrículas de lado $A/2$, $A/4$ e $A/8$, conforme figura 4.2. No momento da divisão deve-se respeitar uma regra que relaciona quadrículas vizinhas. Assim, uma quadrícula de lado $A/2^n$ ($n = 0, 1, 2$, ou 3) só poderá ter como vizinha outra de lado igual ($A/2^n$), ou de lado imediatamente superior ($A/2^{n-1}$), ou de lado imediatamente inferior ($A/2^{n+1}$).

FIGURA 4.2 – Discretização da quadrícula.

Após finalizada a etapa de eliminação e divisão de quadrículas, passa-se, então, para a fase final de discretização da bacia, que consiste na entrada, por quadrículas, das seguintes informações:

1. Altitude mínima (Z) – obtida a partir de observações em cartas plani-altimétricas da SUDENE;
2. Indicação do tipo da malha – o modelo distingue 2 tipos possíveis para as quadrículas. Um tipo é a malha rio, que é aquela que faz ligação direta entre um elemento da estrutura hidráulica (reservatórios, postos fluviométricos, etc.). O outro é a malha solo, que não faz este tipo de ligação, nem contém elemento de estrutura hidráulica;
3. Sentido de drenagem (NW, NE, EN, ES, SE, SW, WS, WN ou WN) – definido em função da rede de drenagem e da altitude mínima, uma vez que uma quadrícula só drena para outra de altitude inferior. São 8 os possíveis sentidos de drenagem, conforme a figura 4.3, valendo salientar que à quadrícula representante do exutório da bacia é atribuído o sentido genérico “Ex”;
4. Zonas hidrológicas homogêneas – a partir de mapas de solo, vegetação (ou ocupação do solo), geologia e, eventualmente, topografia, define-se, na bacia hidrográfica, as zonas hidrológicas homogêneas. Estas zonas

são áreas para as quais, sob uma mesma precipitação e mesma umidade inicial do solo, tem-se uma mesma resposta hidrológica, ou seja, apresentam mesma função de produção de água. Assim, com o auxílio de ferramentas de um Sistema de Informações Geográficas, superpõe-se o mapa das zonas hidrológicas homogêneas com o mapa da bacia discretizada, e, para cada quadrícula, determina-se a porcentagem de área de cada uma destas zonas;

5. Elemento da arquitetura hidráulica – tais elementos são formados pelos reservatórios construídos ou em projeto, captações de água ao longo do rio, pontos de transposição de vazões entre bacias, postos fluviométricos e exutórios de sub-bacias, sendo que cada quadrícula pode conter, no máximo, 1 elemento de estrutura hidráulica. Os açudes podem ser de ordem 1 ou 2. Os de ordem 1 são os pequenos e, sobre eles, não há retirada significativa, além de que a montante desses açudes não há açudes. Já os de ordem 2 são os que têm uma maior capacidade. Neles há retiradas significativas. Para cada um destes, faz-se necessário entrar com uma série de informações do tipo: características geométricas, datas de construção e modificação, caso haja alguma. Os outros elementos da estrutura hidráulica são considerados açude de ordem 2, com curva cota / área / volume nula, ou seja, com um único ponto $[0,0,0]$;
6. Zonas pluviométricas e evaporimétricas – através do método de Thiessen, são definidas as quadrículas cujas precipitações são consideradas iguais de um posto pluviométrico. Da mesma maneira, são definidas as áreas de igual evapotranspiração potencial, podendo ser adotada a do tanque classe A ou calculadas pela fórmula de Penman.

FIGURA 4.3 – Sentidos de drenagem.

Caracterizada a bacia hidrográfica, passa-se para a fase de simulação do ciclo hidrológico. Para tanto, são necessários os dados de precipitação e evapotranspiração potencial médias diárias. A simulação do ciclo hidrológico na bacia é realizada através de 3 funções:

I. Função de produção água:

Esta função objetiva simular o ciclo hidrológico através de um conjunto de quatro reservatórios, repartindo a precipitação entre infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração, armazenamento no solo e percolação profunda. Esta função realiza o cálculo das lâminas de água em duas etapas.

Na primeira etapa, realiza-se o balanço hídrico no primeiro reservatório fictício, denominado de reservatório solo (Figura 4.4), e assim determina-se a quantidade de água, em mm, disponível para gerar os escoamentos. Neste reservatório foi introduzido um termo que é responsável pela geração do escoamento superficial direto (Q_{sur}). Este termo permite a geração de escoamento superficial direto mesmo se a intensidade da precipitação for inferior à capacidade de infiltração, e o solo não estiver saturado (GOULA BI TIE, 1993). A ocorrência deste tipo de fenômeno é típico de regiões semi-áridas, onde em geral os solos, cobertos por uma vegetação esparsa, apresentam uma crosta superficial (MONTENEGRO, 1990). Essa situação é modelada pela seguinte formulação:

$$Q_{sur} = 0 \quad \text{se } P_m \leq ETP$$

$$Q_{sur} = (P_m - ETP).K_{rs} \quad \text{se } P_m > ETP$$

Sendo:

$$Krs = \text{Min}\left(\frac{R + Pm}{R_{\max}}, C_{rs}\right)$$

E:

C_{rs} , o coeficiente máximo do escoamento superficial direto.

FIGURA 4.4 – Reservatório Solo.

No reservatório solo (Figura 4.4), o balanço hídrico é realizado através da divisão da do total precipitado em dois termo, assim tem-se:

Caso $R + P > R_{\max}$, tem-se dois termos (figuras 4.5 e 4.6):

FIGURA 4.5 – Primeiro termo da componente ÁGUA

No primeiro termo, figura 4.5, a quantidade de ÁGUA disponível para gerar o escoamento é determinada por : $R + P - R_{\max}$

FIGURA 4.6 – Segundo termo da componente ÁGUA

Para o segundo termo a quantidade de ÁGUA disponível para gerar o escoamento é determinada em função das características geométricas da figura 4.6, logo o segmento de reta OO' é igual a média dos segmentos AD e BC , assim tem-se:

$$OO' = \frac{AD + BC}{2} \quad (1)$$

Pela semelhança de triângulos da figura 4.4 pode-se tirar que:

$$\frac{AD}{RBA} = \frac{0,5}{DCR} \quad (2)$$

E também que:

$$\frac{BC}{DR + RBA} = \frac{0,5}{DCR} \quad (3)$$

Rearranjando os termos das equações (2) e (3), tem-se os comprimentos dos segmentos de reta AD e BC :

$$AD = \frac{0,5.RBA}{DCR} \quad (4)$$

$$BC = \frac{0,5.(DR + RBA)}{DCR} \quad (5)$$

Substituindo as equações (4) e (5) na equação (1), tem-se:

$$OO' = \frac{1}{2} \left(\frac{0,5.RBA}{DCR} + \frac{0,5.DR}{DCR} + \frac{0,5.RBA}{DCR} \right)$$

Agrupando-se os termos de mesmos numerador, tem-se:

$$OO' = \frac{1}{2} \left(\frac{RBA}{DCR} + \frac{0,5.DR}{DCR} \right)$$

Multiplicando-se o numerador e o denominador por 2, tem-se:

$$OO' = \frac{1}{2} \left(\frac{RBA + 0,5.DR}{CRT - DCRT} \right) \quad \left[\frac{(x2)}{(x2)} \right]$$

Ou ainda:

$$OO' = \frac{2.RBA + DR}{4.(CRT - DCRT)}$$

Multiplicando-se a expressão acima pela constante DR , tem-se:

$$DR.OO' = \frac{2.RBA + DR}{4.(CRT - DCRT)} . DR$$

E desta forma chega-se ao termo relativo a quantidade de ÁGUA formada pelo segundo termo (figura 4.6)

$$DR.OO' = \frac{DR.(2.RBA + DR)}{4.(CRT - DCRT)} \quad (6)$$

Assim, genericamente, pode-se ter dois casos:

Caso ($R + P > R_{max}$), tem-se tanto o primeiro como o segundo termo, e matematicamente, obtém-se:

$$\dot{A}GUA = R + P - R_{max} + \frac{DR.(2.RBA + DR)}{4.(CRT - DCRT)}$$

Caso ($R + P \leq R_{max}$), tem-se apenas o segundo termo (figura 4.6), e matematicamente, obtém-se:

$$\dot{A}GUA = \frac{DR.(2.RBA + DR)}{4.(CRT - DCRT)}$$

De uma forma genérica, tem-se:

$$\dot{A}GUA = \text{Max}(R + P - R_{max}, 0) + \frac{DR.(2.RBA + DR)}{4.(CRT - DCRT)}$$

Em seguida tem-se as fórmulas para determinação de:

$$DR = \text{Max}(RHA - RBA, 0)$$

$$RBA = \text{Max}(R, DCRT) - DCRT$$

$$RHA = \text{Min}[\text{Max}(R + P, DCRT), R_{max}] - DCRT$$

$$CRT = \frac{R_{max} - DCRT}{2} + DCRT$$

$$R_{max} = 2.CRT + DCRT$$

Para realização do balanço hídrico no reservatório solo, faz-se necessário calcular a evapotranspiração real, através da seguinte fórmula:

$$ETR_j = R_j + P_{j-1} - \dot{A}GUA_{j-1} - ETR_{j-1}$$

Assim, pode-se calcular a reserva de água no solo no passo de tempo seguinte (R_{j+1}), através da expressão:

$$R_{j+1} = R_j + P_j - \dot{A}GUA_j - ETR_j$$

Na segunda etapa, realiza-se a repartição da quantidade de água disponível para os escoamentos ($\dot{A}GUA$) em escoamento superficial e escoamento de base (Figura 4.1). No primeiro reservatório, separa-se a quantidade de água em escoamento superficial (QR) e escoamento infiltrado (QI), através da função de infiltração (FN), que corresponde ao valor máximo da infiltração para um passo de tempo, expressa em mm, assim tem-se:

$$QI = \text{Min}(\text{ÁGUA}, FN)$$

$$QR = \text{Max}(\text{ÁGUA} - QI, 0)$$

Em seguida, são geradas componentes retardadas para o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo, através dos dois últimos reservatórios fictícios. O termo relativo ao escoamento superficial é obtido pela divisão, da soma dos termos QR e QSUR, em dois novos termos QRR1 e QRR2, cuja soma resulta no escoamento superficial (QRR), desta forma tem-se:

$$QRR = QRR1 + QRR2$$

Sendo que o QRR1 representa a componente instantânea, e QRR2 representa o escoamento subsuperficial retardado em função do nível RR, no reservatório de escoamento superficial (Figura 4.1), assim tem-se:

$$RR_{(j+1)/2} = RR_j + QR_j + QSUR_j$$

$$QRR2_j = CQR \cdot RR_{(j+1)/2}$$

$$QRR1_j = \text{Max}(RR_{(j+1)/2} - QRR2_j - Q_{\text{rmax}}, 0)$$

$$RR_{j+1} = RR_{(j+1)/2} - QRR2_j - QRR1_j$$

Onde:

- $RR_j, RR_{(j+1)/2}, RR_{j+1}$ – Representam os níveis de água no reservatório de escoamento superficial no passo de tempo inicial, em um tempo intermediário ao processo de escoamento, e no passo de tempo seguinte, respectivamente;
- CQR – Representa o coeficiente do reservatório de escoamento superficial;

O processo, anteriormente descrito, também é utilizado para o escoamento de base (QI). O termo QI é repartido em dois termos, QII1 e QII2 (Figura 4.1), assim tem-se:

$$QII = QII1 + QII2$$

$$RFreat_{(j+1)/2} = RFreat_j + QI_j$$

$$QII2_j = CQI \cdot RFreat_{(j+1)/2}$$

$$QII1_j = \text{Max}(RFreat_{(j+1)/2} - QII2_j - QI_{\text{max}}, 0)$$

$$RFreat_{j+1} = RFreat_{(j+1)/2} - QII1_j - QII2_j$$

Onde:

- $RFreat_j$, $RFreat_{(j+1)/2}$, $RFreat_{j+1}$ – Representam os níveis de água no reservatório subterrâneo no tempo inicial, em um tempo intermediário e no passo de tempo seguinte, respectivamente;
- CQI – Representa o coeficiente de esvaziamento do reservatório de alimentação do lençol;

E desta maneira, chega-se ao valor da lâmina escoada (Q), para uma determinada unidade hidrológica homogênea (função de produção), dentro de uma zona de precipitação (ou produção de água), a qual é dada pela seguinte expressão:

$$Q = QRR + QII$$

II. Função de transferência de água:

Para a transferência dos volumes escoados para as quadrículas rio, utiliza-se o método das Isócronas. A definição das zonas isócronas é feita em função do tempo de concentração (T_c) da bacia hidrográfica, expresso em dias e fração de dia. O número de zona isócronas (NZC) é igual ao tempo de concentração arredondado para o inteiro superior. Por exemplo, se o tempo de concentração for estimado em 3,2 dias, então o número de zonas isócronas será igual a quatro (Figura 4.7).

FIGURA 4.7 – Zonas isócronas.

O método da definição das zonas isócronas é iniciado pelo cálculo do tempo de transferência (TRF) entre uma quadrícula i , de montante, para uma quadrícula $i + 1$, imediatamente a jusante. Este tempo é inversamente proporcional à raiz quadrada da declividade; assim:

$$TRF_{i,i+1} = k \cdot d_i / \sqrt{(Z_i - Z_{i+1}) / d_i}$$

Sendo que:

- d_i – representa a distância entre os centros geométricos das quadrículas i e $i + 1$;
- Z_i e Z_{i+1} – representam, respectivamente, as altitudes das quadrículas i e $i + 1$;
- k – equivale ao inverso da velocidade média de translado.

Tomando-se o tempo de concentração da bacia, definido como o tempo que a água precipitada leva para sair do ponto mais distante do exutório e atingi-lo, pode-se defini-lo pela seguinte expressão:

$$Tc = \text{Max} \left[\sum_{i,i+1=1}^n TRF_{i,i+1} \right]$$

$$Tc = k \text{Max} \left[\sum_{i,i+1=1}^n d_i / \sqrt{\frac{Z_i - Z_{i+1}}{d_i}} \right] \quad (7)$$

Sendo:

- n – quantidade de quadrículas percorrida pela água, desde uma quadrícula i até o exutório;

Assim, o coeficiente de proporcionalidade ou o inverso da velocidade de translado na célula (k) é determinado pela equação 7, o qual servirá para realizar a associação, em cada quadrícula, do número da isócrona a qual pertence, através da seguinte expressão:

$$Nzi = \text{INT} \left[\frac{k \cdot \sum_{i,i+1}^n (d_i / \sqrt{(Z_i - Z_{i+1}) / d_i})}{Tc} \cdot NZC \right]$$

Em que:

INT – É uma função que determina a parte inteira da expressão anterior.

Por outro lado, o volume disponível (Q_i^j), em cada quadrícula rio, i , a cada passo de tempo, j , é determinado pela seguinte expressão:

$$Q_i^j = \sum_{k=1}^n QD_k^{j-k+1}$$

Sendo, QD_k^{j-k+1} o volume escoado calculado, no passo de tempo $(j - k + 1)$, sobre a zona isócrona de número k . Os volumes escoados (QD_k^{j-k+1}) são determinados a

partir do produto das lâminas de água escoada (Q) pela área da zona hidrológica homogênea associada, contida na zona isócrona k , no passo de tempo $(j - k + 1)$.

III. Função balanço hídrico nos açudes:

O AÇUMOD tem incorporado o cálculo do balanço hídrico dos açudes na simulação do ciclo hidrológico. Isto faz-se necessário uma vez que, a construção de reservatórios na rede de drenagem modifica todo o comportamento hidráulico e hidrológico da bacia hidrográfica. Assim, realiza-se a cada dia, de montante para jusante, o balanço hídrico de cada açude implantado na bacia; neste, são considerados os volumes precipitados sobre sua superfície, as contribuições sobre a área da bacia hidráulica descoberta, as perdas por evaporação, os volumes de retirada (abastecimento, irrigação, etc.), os volumes restituídos na rede hidrográfica (vazões ecológicas ou de operação do reservatório), os volumes vertidos e, a principal contribuição, que se refere ao volume de água escoado pela bacia hidrográfica do reservatório, respeitando-se sempre, o tempo de percurso em função das zonas isócronas.

5.0 – A SIMULAÇÃO

Para se poder realizar a simulação do ciclo hidrológico da bacia do Rio do Peixe foi necessário construir uma série de arquivos de entrada. Tais arquivos têm o objetivo de informar ao modelo as características físicas, hidro-climáticas, entre outras informações pertinentes à bacia hidrográfica. Para tanto, este tópico além de descrever as simulações que foram realizadas com o modelo AÇUMOD, também apresenta todos os passos necessários à formação dos arquivos de entrada para a simulação, bem como os diversos módulos do modelo AÇUMOD. Os módulos que são apresentados neste trabalho foram desenvolvidos através de um convênio firmado entre a SCIENTEC e a Ministério do Meio Ambiente, através da Secretaria de Recursos Hídricos. Foi dentro deste convênio que o autor iniciou os trabalhos de sua dissertação, mais precisamente no ano de 1998, um ano antes de seu ingresso neste programa de mestrado.

Quando o AÇUMOD é executado pela primeira vez, ele ativará uma janela (Figura 5.1) que apresenta as bacias que estão cadastradas, podendo estas estarem sendo modeladas ou já terem sido modeladas. A partir da escolha de uma bacia passa-se para a janela principal (Figura 5.2) do programa, que apresenta as opções do programa, na verdade cada opção desta irá ativar um sub-módulo do programa principal. Nos itens seguintes serão apresentados cada um destes sub-módulos, bem como suas respectivas funções.

FIGURA 5.1 – Tela de entrada do AÇUMOD.

FIGURA 5.2 – Janela principal do programa.

5.1.1 – Dados necessários ao modelo

Neste tópico apresentam-se as etapas relativas à formação dos arquivos de dados necessários à simulação da bacia hidrográfica do Rio do Peixe.

5.1.1.1 – Discretização e atributos

A primeira etapa para modelação do ciclo hidrológico da bacia consiste na discretização física da bacia, tal etapa é realizada acessando-se a opção *Implantar Bacia* (Figura 5.2). O sub-módulo *Implantar Bacia* (Figura 5.3) é responsável pela formação dos arquivos relativos à discretização física da bacia hidrográfica, tais arquivos servem de entrada para o programa MAINGEO, que processa estes arquivos verificando se a bacia foi discretizada corretamente. Além disto este aplicativo gera os arquivos fic10, fic11, fic12 e ficgeo, que são parte dos arquivos de entrada do modelo AÇUMOD. O arquivo fic10, fic11, fic12 e ficgeo contém informações sobre as características físicas da bacia bem como da sua estrutura hidráulica. Para início da implantação da bacia hidrográfica faz-se

necessário ter-se disponível mapas digitais, no formato dwg, do limite da bacia e dos limites das sub-bacias, para que através do software Xlatem® seja realizada a conversão destes mapas para o formato de banco de dados do MSAACCES®.

FIGURA 5.3 – Janela do sub-módulo de *Implantação Bacia*.

O AÇUMOD representa a bacia hidrográfica através de um sistema de quadrículas, para criação destas quadrículas faz-se necessário a entrada das coordenadas, em km, do canto inferior direito e do canto superior esquerdo, além de informar de quanto será o lado (A) da quadrícula mãe, assim denominada pelo fato de ser a de maior lado, uma vez que esta pode ser sub-dividida em quadrículas de lado $A/2$, $A/4$ e $A/8$, conforme Figura 4.2. Para o estudo em questão, as coordenadas para a formação da malha quadriculada foram (680, 9120) e (530, 9300) e como valor da quadrícula mãe foi adotado um lado igual a 5 km.

O passo seguinte, a formação da malha quadriculada consiste, na eliminação de algumas quadrículas de forma a aproximar a malha quadriculada ao limite da bacia hidrográfica. Durante o processo de discretização da bacia, existe a

possibilidade de subdivisão das quadrículas. Esta opção tem o objetivo de melhor representar o limite da bacia hidrográfica e definir as sub-bacias que serão estudadas, além de poder locar os atributos de cada quadrícula. A divisão destas quadrículas está condicionada às regras descritas no item 4.0 – O modelo de simulação chuva – vazão. Neste item ainda são apresentadas as informações características de cada quadrícula, as quais fazem parte da discretização da bacia hidrográfica.

Estas etapas são realizadas através de cliques sobre cada quadrícula, ação esta que ativa a janela apresentada na Figura 5.4, na qual são informadas tais características. Assim, estas informações são cadastradas em um banco de dados, para que, posteriormente, sejam formados os arquivos necessários ao programa MAINGEO, que trata tais informações formando alguns dos arquivos de entrada do AÇUMOD.

FIGURA 5.4 – Janela de entrada das informações das quadrículas.

Ainda para a formação dos arquivos de entrada do MAINGEO faz-se necessário entrar com informações sobre os elementos da arquitetura hidráulica, cadastrando ainda os seus dados de vazões e níveis observados, entre outros dados. Em seguida detalhe-se como se deve proceder com a entrada destes dados, tal procedimento também faz parte da fase de implantação da bacia hidrográfica.

5.1.1 – Elementos da arquitetura hidráulica

Para o modelo AÇUMOD qualquer elemento que possa vir a influenciar o sistema hidráulico da bacia hidrográfica é denominado de elemento da arquitetura hidráulica. Estes elementos são compostos por açudes, construídos ou em projeto, postos fluviométricos, captações ao longo do rio, transferência de vazões entre bacias, além dos exutórios das sub-bacias e da bacia principal. Para cada um destes elementos faz-se necessário a entrada de suas características; tem-se assim:

- Açudes – As informações que devem ser cadastradas para tal elemento encontram-se descritas no item 4.0 – O modelo de simulação chuva – vazão;
- Postos fluviométricos – os postos existentes na bacia hidrográfica e que tenham dados de vazões observadas deverão ser cadastrados, pois estes poderão ser utilizados nos processos de calibração e/ou validação. Para tanto, são necessárias as seguintes informações:
 - ◆ Código do posto fluviométrico;
 - ◆ Nome do posto fluviométrico.
- Captações – as captações existentes ao longo dos cursos d'água deverão ser cadastradas, uma vez que estas exercem influências sobre a estrutura hidráulica da bacia hidrográfica.
- Exutórios de sub-bacias e da bacia – o cadastro destes elementos permite que o usuário tenha informações sobre as vazões naquelas seções, de forma que se possa avaliar índices de disponibilidades e potencialidades para as sub-bacias ou para a própria bacia. Estes elementos têm características semelhantes aos açudes de ordem 1, apenas com a diferença de que sua curva cota / área / volume é composta apenas por 1 ponto, de valores nulos [0,0,0].

O cadastro de qualquer um desses elementos é realizado por cliques com o mouse sobre o elemento hidráulico que se deseja inserir em alguma das quadrículas existentes. Posteriormente com um clique sobre o elemento hidráulico tem-se acesso a janela de entrada das propriedades anteriormente citadas.

Durante o processo de discretização da bacia do Rio do Peixe foram cadastrados um total de 43 elementos hidráulicos sendo 5 açudes de ordem 1; 15

açudes de ordem 2; 2 postos fluviométricos; 9 captações; 11 exutórios de sub-bacias e o exutório da bacia.

A partir desses dados, são formados os arquivos Fic34.mod e Fic44.mod, os quais contém, respectivamente, informações sobre os açudes de ordem 1 e 2. No anexo 3 tem-se a estrutura deste arquivo.

5.1.2 – Dados fluviométricos históricos e de níveis observados nos açudes

Estes conjuntos de dados são necessários à calibração e validação do modelo. Para tanto, faz-se necessário a formação dos arquivos que contenham estes dados. No anexo 3 tem-se a formatação destes arquivos.

Para o estudo em questão, foram utilizados os dados de níveis de 2 açudes: Lagoa do Arroz e Arrojado. Os níveis observados para cada um destes açudes encontram-se em anexo. Também foi utilizado dados de 1 postos fluviométricos, o posto de Aparecida, apresentados na seção 3.6.

5.1.3 – Dados pluviométricos

O modelo AÇUMOD utiliza a precipitação diária espacializada para seus cálculos internos e utiliza, também, a precipitação mensal para o processo de calibração e/ou validação. Estes dados também são utilizados na determinação da potencialidade e disponibilidade da bacia. Os dados de precipitação devem estar consistidos, e em arquivos textos com o formato apresentado no anexo 3.

O modelo traça o polígono de Thiessen para determinar qual o posto pluviométrico que influencia cada quadrícula. Para tanto, deve-se ativar a aba ‘Thiessen’ (Figura 5.5) e abrir um arquivo texto com um nome qualquer, porém de extensão chv. A formatação deste arquivos encontra-se no anexo 3.

Assim, ao se abrir este arquivo o aplicativo irá traçar automaticamente o polígono de Thiessen, gerando o arquivo Fic14.met que contém os dados de precipitação diária para cada quadrícula.

Para o estudo em questão, foram utilizados 11 postos pluviométricos, conforme está descrito na seção 3.5.

FIGURA 5.5 – Janela para processamento dos cálculos do Thiessen.

5.1.4 – Dados evaporimétricos e de evapotranspiração

Os dados diários de evapotranspiração são necessários à simulação do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica. Para o estudo em questão foram, utilizados os dados evaporimétricos do tanque classe A, do posto de São Gonçalo, afetados do coeficiente de tanque igual a 0,8. Estes dados, semelhantemente à pluviometria, podem ser espacializados sobre a bacia, porém, devido à escassez de estações climatológicas na região de estudo, não foi realizada tal distribuição espacial, sendo estes dados considerados iguais para todas as quadrículas. A partir do arquivo com formatação apresentada no anexo 3, é formado o arquivo fic15.met, o qual contém os

valores diários de evapotranspiração para cada quadrícula, definida no processo de discretização.

5.1.5 – Zonas hidrológicas homogêneas

As zonas hidrológicas homogêneas são assim denominadas pelo fato de serem áreas, que estando a uma mesma umidade inicial do solo e afetadas por uma precipitação de mesma intensidade e duração, irá gerar a mesma resposta hidrológica, ou seja, apresentará uma mesma função de produção ÁGUA. Para a simulação do ciclo hidrológico com o AÇUMOD, faz-se necessário definir, para cada quadrícula, a quantidade dessas zonas, pois o modelo realiza para cada uma dessas zonas, em cada uma das quadrículas, um balanço hídrico, determinando em cada passo de tempo a quantidade de água disponível para a geração dos escoamentos. Assim, pode-se ver que as zonas hidrológicas homogêneas influenciam diretamente na geração dos escoamentos, sendo assim, necessário descrevê-las.

Para o estudo em questão, foram definidas 3 zonas hidrológicas homogêneas, esta definição foi realizada basicamente a partir dos mapas de pedologia e geologia, uma vez que a vegetação não exerce uma influência marcante na geração dos escoamentos, já que grande parte da bacia encontra-se tomada pela ação antrópica. A partir do mapa pedológico realizou-se uma classificação dos solos em função da profundidade e da capacidade armazenamento de água em altura equivalente, dos solos que compõem a bacia hidrográfica em estudo. Na tabela 5.1 apresenta-se um breve resumo das zonas hidrológicas homogêneas criadas, bem como seus respectivos parâmetros.

TABELA 5.1 – Características das zonas hidrológicas homogêneas.

Z. H. H.	Classes de solos	Prof. (m)	Capacidade de campo (mm)
Outros Solos	PE - Textura média	1,60	25
	PE - Textura argilosa	1,25	235
	NC - Textura média	0,60	46
	NC - Textura argilosa	0,50	111
	V - Textura argilosa	1,00	225
	SS - Textura média	0,80	110
Aluviões	Ae - Textura méd./ arenosa	1,34	186
	Ae - Textura média	1,72	210
	Ae - Text. méd./ argilosa	1,40	161
	Ae - Textura argilosa	1,40	224
Solos Rasos	Re - Textura arenosa	0,15	7
	Re - Text. arenosa / média	0,17	10
	Re - Textura média	0,20	14

PE – Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico;

NC – Bruno Não Cálcico;

V – Vertissolo;

SS – Solonetz Solodizado;

Ae – Aluvissolo Eutrófico;

Re – Litossolo Eutrófico/Distrófico.

Em análise aos dados apresentados na tabela 5.1 pode-se ver que os Aluviões foram agrupados em uma única zona hidrológica homogênea, como estes solos têm uma profundidade média de 1,45 m com uma capacidade de armazenamento maior que 18 cm. Estes são um tipo de solo que têm uma alta capacidade de retenção de água, tanto que eu é nestas áreas que são perfurados a maioria dos poços amazonas da bacia. Os Aluviões representam cerca de 13% da área da bacia hidrográfica e localizam-se em torno do leito do rio do Peixe.

Já os Solos Rasos, assim denominados pelo fato de terem alturas que variam até 0,20 m, conseqüentemente estes tem uma capacidade de armazenamento muita baixa, chegando até 0,14 cm. Esta zona hidrológica representa cerca de 29% da bacia hidrográfica, localizando-se a Nordeste da bacia, e estando sobre o embasamento cristalino.

Por último agrupou-se os solos que tinham características intermediárias aos Aluviões e aos Solos Rasos, criando-se a zona hidrológica homogênea denominada Outros Solos, quem compõem cerca de 58% da área da bacia hidrográfica e localizando-se, principalmente, a Oeste da bacia. Esta zona hidrológica tem valores de profundidades e capacidades de armazenamento intermediários às 2 zonas anteriormente citadas.

A partir da definição destas 3 zonas hidrológicas homogêneas editou-se, no aplicativo AutoCad R14®, o mapa de pedologia, objetivando gerar o mapa de zonas hidrológicas homogêneas, bem como juntar os tipos de solos que têm características semelhantes. Ao final desta edição realizou-se a transformação do mapa, em formato digital, para o formato numérico. Esta transformação faz-se necessária para que se possa carregar o mapa no módulo de implantação, pois é neste módulo que é realizada a quantificação das áreas das zonas hidrológicas homogêneas (Figura 5.6), por quadrícula. Esta informação, em porcentagem da área da quadrícula é armazenada em um banco de dados para que posteriormente seja formado o arquivo ficgeo, que é a entrada do programa MAINGEO, pois a partir deste é gerado o arquivo fic10 que corresponde a um dos arquivos de entrada do modelo AÇUMOD.

FIGURA 5.6 – Definição das zonas hidrológicas homogêneas.

Uma vez discretizada a fisiografia e as zonas hidrológicas homogêneas da bacia, deve-se proceder a formação do arquivo FICGEO, que contém informações de cada quadrícula, sobre o seu número de ordem, sentido de drenagem, altitude mínima, se ela é uma malha rio ou solo e das porcentagens de áreas das zonas hidrológicas homogêneas.

A finalização da entrada dos dados citados culmina com a formação dos arquivos necessários ao programa MAINGEO, responsável pela discretização física da bacia, e o AÇUMOD, responsável pela simulação do ciclo hidrológico da bacia. Para tanto são formados os seguintes arquivos:

- Fic14.met – arquivo de dados pluviométricos necessário ao AÇUMOD;
- Fic15.met – arquivo de dados evaporimétricos necessário ao AÇUMOD;
- Ficgeo – arquivo com as informações sobre as características físicas da bacia, necessário ao AÇUMOD.

Uma vez formado esses arquivos, é executado o programa MAINGEO, que utilizando o arquivo ficgeo gera o arquivo Fic10, que servirá de entrada para o AÇUMOD.

5.1.6 – Operação dos açudes

Uma das grandes vantagens do modelo AÇUMOD refere-se à simulação do balaço hídrico dos açudes na fase de simulação do ciclo hidrológico, ou seja, na calibração e/ou validação, o modelo realiza a simulação da operação dos reservatórios da bacia hidrográfica; isto é o que possibilita que o modelo seja calibrado com postos fluviométricos que tenham suas medições afetadas pela operação de açudes, ou nos próprios açudes que tenham uma série histórica de níveis.

Para a bacia do rio do Peixe, o melhor exemplo da utilização desta ferramenta do modelo encontra-se na operação do açude Lagoa do Arroz, que tem sua operação realizada pelo escritório local do DNOCS, localizado na cidade de Sousa. As águas do açude Lagoa do Arroz são utilizadas de uma maneira geral para a perenização de parte do riacho Cacaré e do rio do Peixe, promovendo assim, o abastecimento humano e animal da população ribeirinha, e ainda, utilizada para a irrigação difusa às margens destes 2 riachos. Na tabela 5.2, encontram-se os dados relativos à operação deste açude, valendo salientar que a vazão liberada refere-se a quantidade de água que é liberada em um mês, sendo que esta vazão inicia-se no valor mínimo indo até o valor máximo, isto vindo a ocorrer num período máximo de 15 dias. A partir daí, fecha-se a comporta de forma que a vazão volta ao seu valor mínimo, também num período máximo de 15 dias.

TABELA 5.2 – Operação do açude Lagoa do Arroz.

Ano	Período de operação	Vazão liberada (l/s)	Vazão média liberada (l/s)
1993	—	0,00	0,00
1994	—	0,00	0,00
1995	Agosto/Outubro	100,00 – 960,00	530,00
1996	Julho/Dezembro	100,00 – 960,00	530,00
1997	Junho/Dezembro	100,00 – 960,00	530,00
1998	Maio/Julho	100,00 – 500,00	300,00
	Agosto	100,00	100,00
	Setembro/Outubro	100,00 – 250,00	175,00
1999	Setembro/Dezembro	100,00 – 150,00	125,00

Ainda sobre a operação de açudes também, são consideradas como entradas, as informações das quantidades de água retiradas do próprio açude, retiradas estas para o abastecimento humano e irrigação. Vale ainda ressaltar que há uma diferença entre as vazões retiradas na própria bacia hidráulica do açude e as liberadas para usos a jusante, sendo a primeira denominada de retiradas e a segunda de liberadas. Esta diferença é importante para a formação do arquivo de retirada e liberações, o Prelev.mod, que tem a estrutura descrita no anexo 3.

O último arquivo de entrada do AÇUMOD a ser formado é o FICLAC, este arquivo condensa todas as informações cadastradas até o momento. Assim, de uma maneira resumida este arquivo contém informações sobre o período de simulação, o nome da bacia em estudo, número de operação dos açudes simulados, período de dados de precipitação, entre outras características da simulação.

Assim, verifica-se que o modelo é versátil, podendo simular a bacia hidrográfica tal qual ela se encontra como também para simular as modificações realizadas ao longo do tempo.

Na figura 5.7 apresenta-se de maneira simplificada, o organograma do modelo AÇUMOD, mostrando os 2 principais programas: o MAINGEO e o AÇUMOD, bem como os arquivos de entrada e saída de cada um destes programas.

FIGURA 5.7 – Organograma do MAINGEO e do AÇUMOD.

RESGEO – Arquivo com as informações sobre a discretização da bacia hidrográfica;
FIC11, FIC12 – Arquivo com informações discretização da bacia hidrográfica, não é utilizado pelo modelo;

FIC10 – Arquivo com as informações de discretização da bacia hidrográfica;

FICLAC – Arquivo com as informações básicas para a simulação;

FIC14.MET – Arquivo com os dados de precipitação diária, em mm;

FIC15.MET – Arquivo com os dados de evaporação diária, em mm;

FIC34.MOD – Arquivo com as curvas cota/área/volume dos açudes de ordem 1;

FIC44.MOD – Arquivo com as curvas cota/área/volume dos açudes de ordem 2 e 3;

PRELEV.MOD – Arquivo de vazões retiradas e liberadas, em l/s;

RESBIL – Resultado do balanço hídrico sobre cada quadricula rio;

RESLAC – Resultado da simulação do balanço hídrico sobre os açudes;

FIC29.RES – Arquivo com as vazões simuladas;

FIC35.RES – Arquivo com os níveis simulados;

FIC36.RES – Arquivo com os números de ordem dos açudes, postos fluviométricos e sub-bacias;

FIC39.RES – Arquivo com os dados dos volumes calculados dos açudes.

5.1. 7 – Período de simulação

Uma vez finalizada a discretização da bacia hidrográfica passa-se para a definição do período de simulação, o qual é definido em função do período de dados de precipitação e de dados de níveis, nos açudes, e/ou vazões nos postos fluviométricos. Para a definição do período de simulação, utiliza-se o aplicativo de mesmo nome (Figura 5.8); nele cadastra-se os períodos de existência de dados de níveis e vazões. Posteriormente, escolhe-se quais os açudes e postos fluviométricos que serão utilizados no processo de simulação. A partir do traçado de um gráfico fica fácil de se analisar o período de cada elemento escolhido, com relação ao período de precipitação (Gráfico 5.1), tal gráfico apresenta o período de dados dos postos fluviométricos e açudes, com relação ao período de dados de precipitação, pois o gráfico apresenta estes dados superpostos um ao outro, de maneira que pode-se escolher o período para o qual tem-se mais dados com um mesmo período comum. Ao final desta análise, deve-se digitar o mês e ano inicial da simulação, bem como o mês e ano final, para que seja formado o arquivo Período.mdl, que contém tais informações.

Açudes

Código	Açude	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5
4	Aç. Caldeirão	00/00-00/00	00/00-00/00	00/00-00/00	00/00-00/00	00/00-00/00
5	Aç. Gamela	11/96-03/97	10/97-01/98	00/00-00/00	00/00-00/00	00/00-00/00

Postos Fluviométricos

Código	Posto Flux.	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5
37262000	Antena Navano	01/94-12/92	00/00-00/00	00/00-00/00	00/00-00/00	00/00-00/00
37290000	Aparecida	01/94-12/99	01/94-12/94	00/00-00/00	00/00-00/00	00/00-00/00

Pontos de Observação

Código	Pontos de Observação	Períodos
9	Aç. Piões	06/94-03/98
8	Aç. Piões	01/99-12/99

Período de simulação

Mês inicial: Ano Inicial: Mês final: Ano final:

FIGURA 5.8 – Janela do sub-módulo *Escolha do período de simulação*.

O aplicativo para definição do período de simulação é utilizado a calibração e a validação. Nesta seção, serão apresentados os 2 períodos que foram utilizados para o estudo.

5.1.7.1 – Período da calibração

Para a calibração, será necessário determinar os parâmetros de 3 zonas hidrológicas homogêneas; assim, faz-se necessário uma maior quantidade de pontos de controle e análise entre os dados gerados e observados. Desta maneira através do gráfico 5.1, que apresenta os períodos de dados observados para os açudes e postos fluviométricos, estes com relação aos períodos de precipitação, facilmente se vê a superposição de período destes dados, e assim se escolheu o período para o qual se tinha a maior quantidade de períodos comuns. Para esta etapa da simulação escolheu-se o período compreendido entre janeiro de 1994 e dezembro de 1999, totalizando 6 anos de dados pluviométricos. O principal fator para a escolha deste período se deu

em função da quantidade de pontos de controle (ver tabela 5.3) com períodos dados comuns, sendo estes bem distribuídos espacialmente na bacia hidrográfica estudada, e também devido ao melhor conhecimento das características que influenciam na simulação.

TABELA 5.3 – Período dos dados observados para os pontos utilizados na calibração.

Ponto de controle	Primeiro período
Posto fluv. De Aparecida	1/1994 – 12/1997
Aç. Lagoa do Arroz	1/1994 – 12/1999
Aç. Arrojado	3/1996 – 2 /1997

5.1.7.2 – Período da validação

A validação do modelo tem o objetivo de verificar se os parâmetros determinados na calibração conseguem simular adequadamente o ciclo hidrológico da bacia hidrográfica. Desta maneira para esta fase não são necessários tantos pontos de controle quanto os utilizados na calibração. Assim, escolheu-se o período compreendido entre janeiro de 1963 e dezembro de 1972, que totaliza 10 anos de dados, ou seja, 120 meses para esta simulação. Sendo que para o período da validação tinha-se apenas a série histórica do posto fluviométrico de Antenor Navarro. Este ponto de controle foi escolhido de maneira a verificar também a performance do modelo, uma vez que os dados deste posto não foram utilizados na fase de calibração e ainda para este período de validação escolhido as características da bacia hidrográfica certamente não se assemelhavam às do período da calibração. Um fato notável é a pequena quantidade de açudes existente no período de validação, já no período de calibração estes aumentaram consideravelmente, modificando assim o comportamento hidráulico-hidrológico da bacia hidrográfica. Ainda dentro deste período escolhido para validação têm-se eventos chuvosos de magnitudes diversas.

GRÁFICO 5.1 – Estudo do período para as simulações.

5.2 – CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do AÇUMOD consiste em se determinar um conjunto de parâmetros para cada uma das 3 zonas hidrológicas homogêneas definidas anteriormente. Desta forma procurou-se utilizar o máximo de informações existentes, ou seja, quanto maior a quantidade de informações especializadas sobre a bacia hidrográfica, maiores as chances de se obter uma melhor representatividade de mesma.

Para a realização da calibração do AÇUMOD faz-se necessário a formação dos seguintes arquivos:

- Fic34.mod – arquivo com informações sobre as características físicas dos açudes de ordem 1;
- Fic44.mod – arquivo com informações sobre as características físicas dos açudes de ordem 2;
- Prelev.mod – arquivo com informações sobre as retiradas e liberações sobre os açudes de ordem 2, ressaltando que sobre os açudes de ordem 1 não há retirada nem restituição;
- Ficlac – arquivo com informações sobre a bacia hidrográfica simulada, tais como: nome da bacia, tempo de concentração, área da bacia, etc.

A formação dos arquivos descritos anteriormente é realizada no módulo denominado *CALIBRAÇÃO* (Figura 5.9). Neste módulo também é realizada a calibração do modelo. Para tanto, tem-se um total de 8 botões que têm as seguintes finalidades:

FIGURA 5.9 – Janela do sub-módulo *CALIBRAÇÃO*.

1. Botão: Mapa de zonas hidrológicas homogêneas – Permite que o usuário visualize o mapa da distribuição espacial das zonas hidrológicas homogêneas, bem com seus respectivos nomes. Com ele o usuário não precisa retornar ao módulo de implantação para analisar o comportamento e a distribuição das zonas hidrológicas homogêneas sobre a bacia hidrográfica simulada;
2. Botão: Parâmetros – Este botão ativa uma janela que contém uma tabela com os parâmetros do modelo AÇUMOD, para cada zona hidrológica homogênea. Nesta janela, tem-se um valor padrão para cada zona hidrológica homogênea e para cada parâmetro, podendo estes valores serem modificados a cada execução do modelo, de maneira a ajustá-los. Ainda para cada um destes valores, têm-se os valores mínimos e máximos. Também nesta janela, têm-se os valores relativos ao tempo de concentração da bacia, em dias; coeficiente de perdas na rede de drenagem, em %;

que representa os usos diversos, tais como irrigações difusas; e por último, a altura representativa de inundação, em mm, valor este que representa uma lâmina de água, quando do transbordamento do rio;

3. Botão: Níveis – Ao se clicar sobre este botão ativa-se uma janela que tem uma tabela com todos os reservatórios superficiais. Nesta tabela, deve-se definir a cota do reservatório para o primeiro dia de simulação, em m, observando-se sempre os níveis mínimos e máximos, de cada açude;
4. Botão: Função objetivo – Permite que o usuário escolha o conjunto de funções objetivo que serão minimizadas no processo de calibração. O primeiro grupo de funções objetivo refere-se à relação entre os níveis observados e calculados, e o segundo grupo refere-se à relação entre as vazões observadas e calculadas;
5. Botão: Retiradas – Permite que o usuário defina o histórico das vazões retiradas, em l/s, sobre cada açude e/ou ponto de captação. Ao se clicar sobre este botão tem-se acesso a uma série de tabelas, cada uma referente a um açude, para o período de simulação anteriormente escolhido. Ressalta-se, que os valores de vazões retiradas em cada açude são divididos pelo tipo de uso: Abastecimento humano, abastecimento animal, abastecimento industrial, irrigação e possíveis transferências de vazões entre bacias;
6. Botão: Restituição – Ao se clicar sobre tal botão, tem-se acesso a uma janela idêntica a ativada pelo botão retirada. Porém, diferentemente do item anterior, nesta janela entra-se com os dados de vazões restituídas pelos açudes ou ponto de captação. Essas vazões têm o objetivo de suprir as demandas de pontos de captação localizados a jusante de reservatórios;
7. Botão: Retirada / Restituição – Permite que o usuário tenha acesso a uma tabela que contém o histórico de vazões retiradas e restituídas pelos açudes e pontos de captação, sendo que tais

valores representam uma totalização anual do que foi cadastrado separadamente nas 2 seções anteriores;

8. Botão: Executar – Uma vez ativado cada um dos sub-módulos anteriores, pode-se, então, executar o modelo. Este botão não tem o intuito de apenas executar o AÇUMOD, mas de primeiramente compilar todas as informações cadastradas anteriormente, formando assim, os arquivos citados no início desta seção. Uma vez formados estes arquivos, o modelo é executado, contabilizando assim a realização de um ensaio, o qual quantifica o número de simulações realizadas no processo de calibração. Para cada um desses ensaios, tem-se a chamada da janela de resultados, a qual apresenta para cada posto fluviométrico e açude selecionados no módulo de escolha do período de simulação, um gráfico com os valores de precipitação mensal, vazões ou níveis observados e vazões ou níveis calculados, sendo estes valores para um período mensal. Ainda, nesta janela tem-se o valor da função objetivo selecionada, podendo esta função objetivo ser modificada sem a necessidade de uma nova execução do modelo. Os valores das vazões ou níveis calculados e observados podem ser analisados numericamente. Caso existam dados diários observados, pode-se ter acesso a um gráfico que apresenta estes valores. E por último, pode-se analisar o comportamento dos elementos constituintes do ciclo hidrológico por zona pluviométrica e zona hidrológica homogênea, acompanhando-se assim o rendimento de cada um destes elementos em cada uma destas regiões.

Com a descrição das funções do módulo de calibração do modelo, passa-se agora, aos comentários sobre tal processo. Para essa fase de simulação foram utilizados os dados de níveis observados dos açudes Lagoa do Arroz e Arrojado e a série histórica de vazões do posto fluviométrico de Aparecida. Esses dados foram selecionados pelas seguintes características:

- Açude Lagoa do Arroz – Tinha-se uma série histórica de níveis relativamente longa, dentro de um período sobre o qual se tinha o conhecimento das retiradas e liberações de água deste açude, além de que, aproximadamente, 90% da bacia hidrográfica deste açude é composta pela zona hidrológica homogênea denominada Outros Solos;
- Açude Arrojado – Este açude tinha uma série histórica de níveis curta, 1 ano, Porém o conhecimento das retiradas e liberações existentes, mais o fato de que na bacia hidrográfica, 50% corresponde à zona hidrológica homogênea Solos Rasos e os outros 50%, por Solos Rasos, levou a escolha deste açude para o processo de calibração;
- Posto fluviométrico de Aparecida – Este posto encontra-se localizado no exutório da bacia hidrográfica estudada. Tem sua área composta pelas 3 zonas hidrológicas homogêneas (Aluviões, Solos Rasos e Outros Solos) e uma série histórica de vazões de tamanho adequado para a calibração do modelo.

O processo de calibração do AÇUMOD é realizado manualmente, pelo método das tentativas e erros; a cada modificação nos parâmetros das zonas hidrológicas homogêneas, realiza-se uma simulação e analisa-se uma série de índices indicadores da qualidade da calibração (IIQC). Para o caso em estudo, foram utilizados os seguintes índices:

- Correlação – A correlação (equação 5.1) entre os dados simulados e observados é observada a cada simulação, de maneira a se tentar obter valores sempre próximos da unidade ou no mínimo maiores que 0,70;

$$R = \frac{NDados \cdot \sum_{i=1}^{NDados} Q_{obs_i} \cdot Q_{calc_i} - \sum_{i=1}^{NDados} Q_{obs_i} \cdot \sum_{i=1}^{NDados} Q_{calc_i}}{\sqrt{[NDados \cdot \sum_{i=1}^{NDados} Q_{obs_i}^2 - (\sum_{i=1}^{NDados} Q_{obs_i})^2] \cdot [NDados \cdot \sum_{i=1}^{NDados} Q_{calc_i}^2 - (\sum_{i=1}^{NDados} Q_{calc_i})^2]}}$$

(5.1)

- Função objetivo – A função objetivo (equação 5.2) utilizada durante o processo de calibração, buscava a minimização entre os valores de vazões calculadas e observadas, fossem estas de pequena ou grande magnitude;

$$FO = \frac{\sum_{i=1}^{NMeses} (Qobs_i^{1/2} - Qcal_i^{1/2})^2}{\sum_{i=1}^{NMeses} (Qobs_i)} \quad (5.2)$$

- PBias – A equação de PBias (equação 5.3) tem características de uma função objetivo que deve ser minimizada, sendo que esta busca o ajuste pelos valores médios. O valor desta função permite o conhecimento de quanto às vazões calculadas estão sendo superestimadas, quando o valor desta função for maior que zero, ou sub-estimadas, caso seu valor seja menor que zero.

$$PBias = \frac{\sum_{i=1}^{NMeses} (Qcal_i - Qobs_i)}{NMeses} \quad (5.3)$$

- Volumes escoados superficialmente calculado e observado – Estes 2 índices foram de fundamental importância para a calibração sobre o posto fluviométrico de Aparecida. A cada simulação, analisava-se a totalização dos volumes escoados calculado e observado, de maneira a procurar igualá-los;
- Diferença percentual – Outro índice utilizado na calibração sobre o posto fluviométrico, foi a diferença, em porcentagem, entre os volumes escoados superficialmente calculados e observados. O valor ótimo para este índice seria zero; caso este índice apresentasse valor maior que zero implicava dizer que o volume escoado observado estava sendo superestimado; caso contrário, o volume escoado observado estaria sendo sub-estimado;
- Análise gráfica – Por último, sempre era monitorado o gráfico que representava as séries de vazões e/ou níveis observados e simulados, como também a série de precipitações. Essa análise teve grande importância na calibração sobre o posto fluviométrico,

pois, através dele foram calibrados os parâmetros que regiam os períodos de recessão do hidrograma.

Esses índices são monitorados e analisados a cada simulação, isto com o objetivo de se chegar aos melhores resultados. Mas o principal objetivo desta análise foi de se poder conhecer melhor a estrutura do modelo, de forma a identificar como cada parâmetro do modelo tinha influência sobre cada um dos IIQC, anteriormente citados.

Para iniciar o processo de calibração foram utilizados os valores padrões para as 3 zonas hidrológicas homogêneas, estas sem qualquer ligação com cada uma das zonas. Assim, de uma maneira lógica iniciou-se a calibração dos parâmetros pela zona Outros Solos, pois esta poderia ser calibrada com os dados de níveis do açude Lagoa do Arroz. A cada simulação, eram analisados os IIQC deste açude. Quando se chegou ao ponto que qualquer modificação refletia numa piora nos valores dos índices, considerou-se que a zona Outros Solos estava calibrada e então, passava-se a trabalhar com o açude Arrojado e os parâmetros da zona Solos Rasos. A partir daí, eram analisados os IIQC do açude Arrojado e do açude Lagoa do Arroz. A bacia hidrográfica correspondente era composta por 10% de Solos Rasos, e modificações sobre os parâmetros da zona Solos Rasos implica em modificações na calibração açudes Lagoa do Arroz. Chegou-se então, aos parâmetros ótimos dos Solos Rasos, porém a calibração do açude Lagoa do Arroz encontrava-se levemente modificada, constatando-se a geração de mais água neste açude. Então voltou-se a trabalhar com os parâmetros dos Outros Solos, procurando fazer com que menos água fosse gerada para este açude. Assim, chegou-se aos parâmetros ótimos destas 2 zonas hidrológicas homogêneas, considerando então, que estes 2 conjuntos de parâmetros estavam calibrados.

Por último, passou-se a trabalhar com os dados do posto fluviométrico de Aparecida e com os parâmetros dos Aluviões. Verificou-se, inicialmente, que com a calibração das 2 primeiras zonas, havia uma quantidade excessiva de água sendo gerada neste posto; então, passou-se a trabalhar com os parâmetros dos Aluviões de maneira a se gerar um volume menor de água escoada. É importante salientar que nas simulações realizadas a partir deste ponto, apenas, eram monitorados os IIQC do

posto fluviométrico de Aparecida, uma vez que as bacias hidrográficas dos 2 açudes, inicialmente utilizados na calibração, não tinham Aluviões em sua composição.

Outro fator importante levado em consideração durante todo o processo de calibração foi a busca de parâmetros que representassem adequadamente as características físicas das zonas hidrológicas homogêneas. Tal preocupação pode ser vista nos parâmetros DCRT e CRT, que são responsáveis pela quantidade de água disponibilizada para a realização da repartição em escoamentos superficial e de base. Na tabela 5.4 tem-se o conjunto de parâmetros ótimos.

TABELA 5.4 – Parâmetros do modelo calibrado.

Parâmetros	CRT	DCRT	R	FN	CQR	QRMÁX	CQI	QIMÁX	RNAP	CMS
Solos Rasos	70	25	1	0	0.2	20	0.01	40	0	0.05
Aluviões	550	380	80	-8	0.3	100	0.30	50	80	0.0
Outros Solos	500	350	50	-1	0.4	200	0.10	40	0	0.005

Já na tabela 5.5, têm-se os *índices indicadores da qualidade da simulação*, as correlações indicam que os valores calculados e observados foram bem ajustados, isto pelo fato de que a correlação é caracterizada por duas características: sua magnitude, que sendo maior que 0,70 indica que o relacionamento entre as variáveis é moderado; e o seu sinal, neste caso positivo, indica que valores grandes de vazões observadas implicam em valores grandes de vazões calculadas, da mesma maneira que valores pequenos de vazões calculadas implicam em valores de vazões observadas pequenas, indicando que os resultados têm uma correlação positiva. Sobre as funções objetivo estas não podem ser tomadas como valores ótimos absolutos, uma vez que a combinação de outro conjunto de parâmetros poderá levar a valores menores para estas funções, porém deve-se levar em conta que, durante o processo de calibração, estas convergiram sempre para valores menores, os quais são apresentados como resultado, deve-se ainda lembrar que, para o caso do posto fluviométrico, a função buscava o ajuste do conjunto de vazões, sem levar em conta sua magnitude, fosse ela pequena ou grande, isto pelo fato de que as séries de vazões utilizadas no estudos tinha grande variações na sua magnitude, indo de valores nulos até valores maiores que 100 m³/s. Sobre a função objetivo denominada de PBias, observa-se um bom valor para esta função, já que valores próximos de zero indicam

que os resíduos entre as vazões calculadas e observadas foram pequenos. Por último, têm-se os volumes escoados superficialmente calculado e observado, bem como sua diferença, estes valores se mostrando muito próximos, de maneira a atestar a qualidade do processo de calibração.

Nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12 têm-se os níveis simulados e observados para o açude Lagoa do Arroz e Açude Arrojado, e por último, a representação gráfica das vazões calculadas e observadas para o posto fluviométrico de Aparecida.

TABELA 5.5 – Índices indicadores da qualidade da calibração.

IIQC	Correl.	FO	PBias	Vol. Calc. (x 10 ⁶ m ³)	Vol. Obs. (x 10 ⁶ m ³)	Dif. (%)
Aç. Lagoa do Arroz	0,92	22,92	-	-	-	-
Aç. Arrojado	0,85	4,03	-	-	-	-
Posto Fluv. Aparecida	0,89	0,10	0,01	722,41	721,09	0,19

Figura 5.10 – Níveis simulados X observados para o açude Lagoa do Arroz.

Figura 5.11 – Níveis simulados X observados para o açude Arrojado.

Calibração - Aparecida

Figura 5.12 – Vazões calculadas X observadas para o posto fluviométrico de Aparecida.

5.2.1 – Análise paramétrica do modelo

Objetivando um melhor entendimento da estrutura do modelo e de como este realiza a simulação do ciclo hidrológico, apresenta-se, em seguida, uma resumida análise de cada parâmetro do AÇUMOD. Esta análise inicia-se pelos parâmetros responsáveis pela geração de determinada quantidade de água, o termo ÁGUA.

- DCRT – Parâmetro que representa a capacidade de armazenamento de água no solo; abaixo deste valor, não há geração de escoamentos. Valores pequenos para este parâmetro é traduzido em uma maior quantidade de água gerada, uma vez que o solo irá permitir que apenas uma pequena fração da precipitação seja armazenada. Quanto maior o valor deste parâmetro menor a quantidade de água gerada.
- CRT – Parâmetro que representa a capacidade média de armazenamento de água no solo. O valor deste parâmetro tem que ser maior que o parâmetro DCRT, pois para o cálculo do termo ÁGUA tem-se a expressão abaixo:

$$AGUA = cte / (CRT - DCRT)$$

Assim, se o CRT for igual ao DCRT tem-se uma inconsistência. A forma como este parâmetro determinará a quantidade de água a ser gerada está relacionada com o valor do DCRT, de maneira que quanto maior a distância entre estes 2 parâmetros menor a quantidade de água a ser gerada. Já quando estes 2 parâmetros têm valores próximos, há uma maior quantidade água, dependendo do parâmetro DCRT, pois, se este estiver definido de forma a armazenar grande quantidade de água, esta não será transformada em água para o escoamento.

- Crs – Parâmetro regulador da quantidade de precipitação que se transforma em escoamento superficial direto. Valores grandes para este parâmetro se traduzem em maior quantidade de água transformada em escoamento superficial direto; quanto menor este valor, menor a quantidade de escoamento superficial direto; caso este valor seja igual a zero, nenhuma fração da precipitação será transformada em escoamento superficial direto; isto acontecendo para solos com pouca porosidade onde não há a formação de uma crosta que origina o escoamento superficial direto.

Os próximos parâmetros a serem analisados dizem respeito à transformação e separação do termo AGUA em escoamento superficial e de base.

- FN – Denominado função de infiltração, responsável pela repartição do termo AGUA em escoamento superficial e escoamento de base. Caso a bacia possua solos com pequena profundidade e sobre embasamento cristalino, este parâmetro deverá ter valor igual a zero, de forma que não haverá escoamento de base. Para bacias sedimentares, em que há o escoamento de base, este parâmetro deverá assumir valores negativos, pois assim parte do termo AGUA será transformado em escoamento de base. Quanto maior o valor absoluto deste parâmetro maior a quantidade de água que será transformada em escoamento de base; caso contrário, tem-se um escoamento de base menor.
- QRmáx – Parâmetro que representa o nível máximo do reservatório de escoamento superficial. Este nível é responsável pela repartição do escoamento superficial em escoamento superficial direto e retardado. Este parâmetro tem a função de retardar ou adiantar a geração de vazão, trabalhando assim a forma do hidrograma. Quanto maior o valor do parâmetro QRmáx, menor a quantidade de escoamento superficial direto, pois, para

que seja gerado tal escoamento, um reservatório muito profundo precisa ser preenchido. Caso contrário, tem-se maior quantidade de escoamento superficial direto.

- CQR – Parâmetro responsável também pela repartição do escoamento superficial em direto e retardado, sendo que este parâmetro é utilizado para definir a quantidade de escoamento superficial que será transformado em escoamento superficial retardado, uma vez que este calcula uma fração da quantidade de água, que se encontra armazenada no reservatório do escoamento superficial, e que é transformada em escoamento superficial retardado. Um valor grande para este parâmetro é traduzido em maior quantidade de escoamento superficial retardado, e uma menor quantidade de escoamento superficial direto, já que este reservatório é esvaziado mais rapidamente. No entanto, um valor menor para este parâmetro é traduzido em menor quantidade de escoamento superficial retardado, fazendo assim que este reservatório se mantenha mais tempo cheio, de maneira a gerar maior quantidade de escoamento superficial direto.
- QImáx – Parâmetro que representa o nível máximo do reservatório de escoamento subterrâneo. Este nível é responsável pela repartição do escoamento subterrâneo em escoamento subterrâneo puro e retardado. Este parâmetro tem a função de retardar ou adiantar a geração de vazão de base, trabalhando assim a forma do hidrograma, mas não de maneira tão visível quanto o QRmáx. Quanto maior o valor do parâmetro QImáx, menor a quantidade de escoamento subterrâneo puro, pois para que seja gerado tal escoamento, um reservatório muito profundo precisa ser preenchido. Caso contrário, tem-se maior quantidade de escoamento subterrâneo puro.

- CQI – Parâmetro responsável também pela repartição do escoamento subterrâneo em puro e retardado, sendo que este parâmetro é utilizado para definir a quantidade de escoamento subterrâneo que será transformado em escoamento subterrâneo retardado, já que este calcula uma fração da quantidade de água, que se encontra armazenada no reservatório do escoamento subterrâneo, e que é transformada em escoamento subterrâneo retardado. Um valor grande deste parâmetro é traduzido em maior quantidade de escoamento subterrâneo retardado e em menor quantidade de escoamento superficial puro, pois este reservatório é esvaziado mais rapidamente. Já um valor menor deste parâmetro é traduzido em menor quantidade de escoamento subterrâneo retardado, de modo que este reservatório mantenha-se mais tempo cheio, gerando maior quantidade de escoamento subterrâneo puro.

5.3 – VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação de um modelo chuva-vazão tem a finalidade de verificar se os parâmetros obtidos na fase de calibração conseguem descrever corretamente o ciclo hidrológico. Para a validação dos parâmetros do AÇUMOD foi utilizado 1 novo período, com dados apenas do posto fluviométrico de Antenor Navarro.

Na escolha do ponto de controle para a avaliação da calibração é importante notar que a bacia hidrográfica estudada passou por diversos processos antrópicos, destacando-se principalmente a construção de reservatórios superficiais, o que produz mudanças significativas no comportamento hidráulico-hidrológico da bacia hidrográfica, de maneira que as vazões registradas nos postos fluviométricos têm seus valores modificados.

Desta maneira, o objetivo é saber se os parâmetros determinados na calibração, em que a bacia hidrográfica encontrava-se numa fase avançada de ação antrópica, possibilitam que o modelo consiga representar o ciclo hidrológico, estando a bacia com um nível de ação antrópica menor, com a escolha do período apresentado na seção 5.1.7.2.

Na avaliação das simulações na fase de validação, utilizou-se os *índices indicadores da qualidade da calibração* (IIQC), que foram descritos em seção anterior, e que nesta fase são denominados *índices indicadores da qualidade da validação* (IIQV).

Esta fase do trabalho foi realizada com o auxílio do sub-módulo denominado “Validação” que é acessado a partir da opção “Validar o modelo”, na tela principal do AÇUMOD (Figura 5.1). Este sub-módulo é muito semelhante ao sub-módulo “Calibração”, com a diferença que neste o usuário escolhe um conjunto de parâmetros utilizados no processo de calibração, através do botão “Verificar Parâmetros” assim, é apresentada a janela (Figura 5.13) na qual o usuário tem acesso às diversas simulações realizadas na fase de calibração do modelo, bem como seus resultados. Em seguida, da mesma maneira adotada na fase de calibração, são cadastrados os valores de retiradas e restituições, etc., e por último, executa-se o modelo. Como resultado são apresentados, o hidrograma de vazões calculadas e observadas, uma tabela com os valores das vazões que deram origem ao gráfico, além dos parâmetros que possibilitam a análise da qualidade da validação.

Parâmetros para a Validação

Ensaio: Resultados75.mil

	Função Classe01	Função Classe02	Função Classe03	Função 4
	Valor Pedido	Valor Mínimo	Valor Máximo	
CRT	300.000	0.000	500.000	
DCRT	100.000	0.000	150.000	
R	0.500	0.000	1000.000	
FN	-7.000	3.000	80.000	
CCR	0.010	0.100	0.900	
QRMAX	5.000	5.000	80.000	
CGI	0.010	0.010	0.900	

Função objetivo 1 (Açude)	-99.00	0.02	-99.00	-99.00
Função objetivo 2 (Posto Iluv.)	-99.00	-99.00	0.18	-99.00

Tempo de Concentração (em dias): 1.20

Coef. de Perdas na Rede de Dren. (%): 10

Altura Representativa da Inundação (mm): 15

OK
Cancelar
Gráficos

FIGURA 5.13 – Janela de escolha do conjunto de parâmetros para validação.

Para a validação do modelo, foi utilizada a série histórica de vazões do posto Antenor Navarro, compreendida entre os anos de 1963 e 1972. Nesta análise dos resultados obtidos na validação, pode-se verificar que o conjunto de parâmetros definidos na calibração conseguiu simular adequadamente o ciclo hidrológico, apesar de que o período utilizado nesta fase, a bacia encontrava-se em outras condições. Um fato marcante é a quantidade de açudes, já que no período de calibração foram contabilizados 15 açudes de tamanho e funções relevantes. Já no período de validação havia apenas 4 açudes relevantes. Também é importante salientar que a validação foi realizada num ponto de controle que não tinha sido utilizado na calibração, mostrando assim o sucesso da calibração.

Na tabela 5.6, tem-se os índices indicadores da qualidade da validação; já na figura 5.13, apresentam-se o hidrograma com as vazões observadas e as calculadas pelo modelo.

Em análise aos *índices indicadores da qualidade da validação*, tem-se uma correlação que indica um relacionamento positivo moderado sendo este um bom indicativo da qualidade da validação, uma vez que sua magnitude foi superior ao valor 0,70, e que pelo seu sinal se vê que valores grandes de vazões observadas implicam em vazões

calculadas grandes, da mesma maneira que valores pequenos de vazões calculadas implicam em vazões pequenas. A qualidade da validação ainda pode ser verificada pelo valor da função objetivo, que privilegiava tanto as vazões de grande como as baixa magnitude, característica comum da série de dados fluviométricos, e também pelo valor do Pbias, que indica que os resíduos entre as vazões foram pequenos. Por último tem-se os valores dos volumes escoados superficialmente calculado e observados, bem como a diferença entre esses valores, como pode-se ver a diferença entre esses valores apresentou um valor muito pequeno, o que atesta a qualidade da validação.

TABELA 5.6 – Índices indicadores da qualidade da validação.

IIQV	Correl.	FO	Pbias	Vol. Calc. (x 10 ⁶ m ³)	Vol. Obs. (x 10 ⁶ m ³)	Dif. (%)
Posto Fluv. Ant. Navarro	0,95	0,13	0,05	574,10	560,60	2,41

FIGURA 5.14- Vazões calculadas X observadas para o posto fluviométrico de Antenor Navarro.

5.4 – A POTENCIALIDADE DA BACIA

A potencialidade de uma sub-bacia ou de uma bacia hidrográfica refere-se à quantidade de água que esta poderia disponibilizar, considerando a bacia hidrográfica num estágio tal que ainda não existisse nenhuma intervenção humana na forma de construção de açudes ou de implantação de captações a fio d'água, ou seja a bacia hidrográfica estaria em seu estado natural.

A quantificação da potencialidade hídrica de uma bacia hidrográfica é determinada pela média aritmética da série histórica de vazões naturais, tendo ainda esta série uma grande extensão. Porém esta série de dados, em geral, não é de fácil determinação pelo fato de que séries históricas de vazões naturais são escassas. Na região semi-árida do Nordeste Brasileiro, onde encontrava-se bacia estudada, tais valores inexistem.

Assim, para a determinação deste conjunto de valores, uma vez calibrado e validado o AÇUMOD, realiza-se uma simulação na qual ele torna nulo todas as retiradas e restituições utilizadas nas fases de calibração e validação. Além de anular estes valores, o AÇUMOD zera todas as curvas cota/área/volume dos açudes, isto feito para que não haja a simulação do balanço hídrico dos açudes que compõem a bacia hidrográfica. Desta maneira, considera-se que a bacia em seu estado natural.

Em seguida, é realizada a simulação do ciclo hidrológico com o aplicativo denominado “Potencialidade” (Figura 5.15). Para tanto, faz-se necessário definir o período em que será realizada a simulação. Neste estudo utilizou-se o período compreendido entre janeiro de 1962 e dezembro de 1989, totalizando 336 meses simulados.

O sub-módulo “Potencialidade” (Figura 5.15) apresenta como resultado, a análise estatística sobre a série de vazões calculadas, bem como as curvas de frequência de vazão e os hidrogramas para todos os exutórios de sub-bacias e da bacia principal cadastradas na fase de implantação. Na tabela 5.7 têm-se as potencialidades de cada destes elementos, em l/s e m³/ano. Na figura 5.16, tem-se a curva de frequência de vazões para a bacia hidrográfica do açude Lagoa do Arroz, e figura 5.17, o hidrograma simulado.

FIGURA 5.15 – Janela do sub-módulo *POTENCIALIDADE*.

TABELA 5.7 – Potencialidades das sub-bacias e açudes.

Sub-bacias / açudes	Potencialidade (l/s)	Potencialidade ($\times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$)
Riacho Poço Dantas	400,00	12,44
Riacho Morto 2	690,00	21,46
Riacho Cambita	100,00	3,11
Riacho Chupadouro	100,00	3,11
Riacho Jurema	620,00	19,28
Riacho Morto 1	150,00	4,67
Riacho das Araras	1.280,00	39,81
Riacho da Serra	2.370,00	73,72
Riacho Cacaré	1.330,00	41,37
Riacho Zé Dias	1.280,00	39,81
Riacho Boi Morto	1.270,00	39,50
Rio do Peixe	10.390,00	323,17
Açude Gamela	11,60	0,36
Açude Arrojado	52,60	1,64
Açude Cachoeira da Vaca	7,00	0,22

TABELA 5.7 – Potencialidades das sub-bacias e açudes (Continuação).

Sub-bacias / açudes	Potencialidade (l/s)	Potencialidade (x10⁶m³/ano)
Açude Pilões	1.121,50	34,88
Açude Lagoa do Arroz	1.220,60	37,97
Açude São Francisco	42,00	1,31
Açude Divinópolis	62,60	1,95
Açude Caldeirão	8,80	0,27
Açude Serra Branca	213,50	6,64
Açude Sousa Maciel	36,50	1,14
Açude Roça Nova	82,00	2,55
Açude Chupadouro	100,50	3,13
Açude Santo Antônio	643,40	20,01
Açude Serra Vermelha	66,60	2,07
Açude Santa Helena	15,00	0,47

FIGURA 5.16 – Curva de frequência para a bacia hidrográfica do aç. Lagoa do Arroz.

5.5 – A DISPONIBILIDADE DA BACIA

Para bacias hidrográficas que não têm rios perenes, como é o caso da bacia em estudo, a disponibilidade hídrica é determinada sobre os reservatórios superficiais, uma vez que a água armazenada é que possibilita o suprimento aos usos múltiplos. Para a bacia do rio do Peixe, os usos múltiplos podem ser resumidos em abastecimento humano e irrigação, sendo que o segundo tipo de uso tem valores mais expressivos, chegando a representar cerca de 70% do total demandado.

Para o cálculo da disponibilidade, utilizou-se o programa CadiLac, que é parte integrante do Sistema de Apoio do Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos. Neste aplicativo, utiliza-se de informações geradas pelos sub-módulos anteriores, relacionadas, a seguir:

- Arquivo com as características físicas e geométricas dos açudes: volume mínimo, morto e máximo; curva cota/área/volume, entre outras;
- Arquivo com os valores de evaporação média mensal, em mm;
- Arquivo com os valores de precipitação mensal, em mm;
- Arquivo com as vazões médias mensais, em m³/s, geradas pelo AÇUMOD através do módulo de cálculo das potencialidades;

Com estes arquivos, são calculadas as disponibilidades de cada açude. Para a determinação das disponibilidades em cada açude, o CadiLac realiza os cálculos baseados na equação de conservação de massa, comumente conhecida por equação do balanço hídrico, expressa por:

$$V_{i+1} = V_i + V_{Aflu\ i} + V_{prec\ i} - V_{evp\ i} - V_{dem\ i} \quad (5.4)$$

Sendo:

V_{i+1} e V_i – os volume armazenado do final e no início do mês i , respectivamente;

$V_{Aflu\ i}$ – o volume afluente ao reservatório, no mês i ;

$V_{Prec\ i}$ – o volume de água precipitado sobre a lâmina do reservatório, no mês i ;

$V_{Evp\ i}$ – o volume de água evaporado sobre a lâmina do reservatório, no mês i ;

$V_{\text{Dem } i}$ – a quantidade de água retirada no mês i do reservatório (este valor é considerado constante durante todo o período de simulação do balanço hídrico).

As condições de contorno e iniciais são, descritas abaixo:

$V_{i+1} \leq V_{\text{máx}}$ – o volume armazenado do açude não poderá ser maior que o volume máximo do mesmo. Caso ocorra esta situação, o volume contabilizado a mais será chamado de volume sangrado;

$V_{i+1} \geq V_{\text{morto}}$ – o volume armazenado no açude deverá estar sempre acima do volume morto do reservatório. Caso fique abaixo, considera-se que o reservatório falhou, ou seja, não atendimento da demanda imposta a ele;

V_{inicial} – Volume inicial do reservatório.

Ao final dos cálculos, são totalizadas as falhas ocorridas durante a simulação e calculada então a garantia para o valor da vazão de retirada imposta ao açude. A equação seguinte apresenta a formulação para determinação da garantia.

$$\text{Gar} = (\text{Nmeses} - \text{Falhas}) * 100 / \text{Nmeses} \quad (5.5)$$

Em que:

Gar – a garantia, em porcentagem, associada à vazão demandada;

Nmeses – o número total de meses simulados;

Falhas – a quantidade de meses em que a demanda não foi atendida.

Uma vez descrita a metodologia para a determinação do balanço hídrico para um açude, passa-se a expor como o valor da disponibilidade pode ser determinado com o auxílio do aplicativo CadiLac. Na tela inicial do programa (Figura 5.17), monta-se a estrutura hidráulica esquematizada, formada pelos açudes que serão simulados e por links entre estes, tal estrutura é montada com relativa facilidade, ou seja, a partir de cliques sobre o objeto que representa o açude pode inserir tal objeto na tela principal do CadiLac, em seguida pode-se clicar sobre o objeto que permite ligação entre açude, e desta maneira o próprio aplicativo vai montando um arquivo interno no qual ele tem o conhecimento de qual açude está a montante ou a jusante de outro. Em seguida, clicando-se sobre cada um dos açudes, carrega-se as informações necessárias à simulação do balanço hídrico. Então, gera-se a curva de garantia do reservatório, e para um determinado nível de garantia, tem-se uma vazão associada, que será utilizada como vazão de demanda do açude. Por último, executa-se o balanço hídrico do açude, com o valor de demanda definida em função da garantia desejada. Para o caso em estudo, definiu-se uma garantia de 100% para açudes

que tivessem retiradas para o abastecimento e 98% para os açudes que são utilizados para a irrigação.

Todas essas etapas são realizadas de montante para jusante, pelo fato de que, para cada açude, é gerado um arquivo de vazões sangradas e, existindo um açude a jusante, este receberá tais contribuições. Durante o cálculo das disponibilidades, os açudes são operados conjuntamente, isto pelo motivo de que qualquer modificação sobre a vazão retirada sobre um açude de montante irá modificar a disponibilidade do açude de jusante.

Para o estudo em questão, foram utilizadas as vazões médias mensais geradas para o período de 1962 a 1989, totalizando 336 meses simulados. Na figura 5.18 tem-se o esquema da estrutura hidráulica dos açudes da bacia do rio do Peixe. Na tabela 5.8, apresentam-se as disponibilidades de cada açude simulado.

FIGURA 5.18 – Esquema da estrutura hidráulica dos açudes da bacia do rio do Peixe.

TABELA 5.8 – Disponibilidades dos açudes da bacia do rio do Peixe.

Nome do açude	Disponibilidade (l/s) a 100 %	Disponibilidade (l/s) a 98 %	Disponibilidade (hm ³ /ano) a 100 %
Gamela	2,34	3,26	0,07
Arrojado	16,26	20,90	0,51
Cach. da Vaca	1,27	2,51	0,04
São Francisco	11,63	16,29	0,36
Divinópolis	7,46	11,20	0,23
Caldeirão	0,95	1,83	0,03
Serra Branca	0,00	26,85	0,00
Sousa Maciel	9,58	15,02	0,30
Pilões	0,00	130,92	0,00
Roça Nova	1,7	10,98	0,05
Chupadouro	0,00	33,48	0,00
Lagoa do Arroz	526,57	656,21	16,37
Santo Antônio I	41,85	59,49	1,30
Serra Vermelha	18,95	29,45	0,59
Santa Helena	0,00	1,82	0,00

Um estudo mais detalhado sobre a disponibilidade do açude Lagoa do Arroz foi realizado, pelo fato de que o conceito de vazão regularizada, como é utilizado comumente, é inadequado, como será discutido adiante.

Considerar a vazão regularizada constante ao longo do período de simulação não seria correto, uma vez que nos períodos chuvosos, em geral, os açudes não são utilizados para a irrigação, o que faz com que o açude venha a armazenar maior quantidade de água neste período. Já na estação seca, o reservatório passa a ser utilizado de uma maneira mais intensa, visto que neste período a demanda de água para a irrigação é ativada.

Por esse fato, desenvolveu-se uma planilha no Excel com o objetivo de realizar um estudo sobre os conceitos de disponibilidade. Para tanto, utilizou-se o açude

Lagoa do Arroz, o qual tem a maior capacidade dentre os utilizados no estudo de disponibilidade.

Na metodologia utilizada para o cálculo da nova disponibilidade do açude Lagoa do Arroz, foi feita uma modificação na equação do balanço hídrico (Equação 5.4), escrita da seguinte maneira:

$$V_{i+1} = V_i + V_{\text{Aflu } i} + V_{\text{prec } i} - V_{\text{evp } i} - V_{\text{abast } i} - V_{\text{irrig } i} \quad (5.6)$$

Pela equação 5.6, as retiradas, que antes eram consideradas numa única parcela ($V_{\text{dem } i}$) agora são discretizadas em um volume para o abastecimento humano ($V_{\text{abast } i}$) e outro para a irrigação ($V_{\text{irrig } i}$), os quais ainda podem ser discretizados mensalmente, de maneira a possibilitar a operação mensal do reservatório. De maneira semelhante à equação 5.5, quanto à garantia, tem-se também esse termo na equação 5.5 porém, a quantidade de falhas é contabilizada separadamente para o abastecimento e para irrigação. Outro fato a ser salientado, é que no processo de simulação do balanço hídrico, primeiro retira-se o volume necessário ao abastecimento e, em seguida, caso haja volume suficiente armazenado, retira-se o volume de água para a irrigação, isto pelo fato de que o abastecimento humano é considerado uso nobre e prioritário.

Na simulação com a discretização da retiradas para o abastecimento humano e para a irrigação sendo retiradas separadamente, chegou-se a uma vazão regularizada de 560,19 l/s contra 526,57 l/s, que foi a vazão determinada pelo método convencional. Aqui ressalta-se ainda que, para se chegar a tal resultado foi necessário a suspensão da demanda para irrigação durante os meses de novembro e dezembro de 1983, porém é importante se vê que durante os outros meses utilizados na simulação não houve redução da demanda para irrigação podendo estas ainda serão aumentadas de maneira a aumentar o vazão regularizada sem impor novos racionamentos.

Como se pode ver há uma diferença de 34 l/s entre a simulação do balanço hídrico com uma demanda constante no tempo e a outra com a demanda variável no tempo, de maneira que tal diferença seria suficiente para abastecer os municípios, que hoje são abastecidos por mananciais da própria bacia hidrográfica, e ainda promover a irrigação de áreas ribeirinhas, como ocorre atualmente. De fato, isto realmente poderia vir a ocorrer, já que na última grande seca ocorrida há 2 anos, o açude Lagoa do Arroz contava com volume considerável de água armazenada, de maneira que mesmo durante este período de estiagem o referido reservatório vinha sendo utilizado para a irrigação.

A partir deste estudo simplificado pode-se ver o quanto é necessário uma modificação sobre o conceito de vazão regularizada de maneira a se poder simular o balanço hídrico de reservatórios tal qual ele é simulado na realidade.

6.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Devido à extensão do trabalho realizado para a implantação do Sistema de Apoio ao Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos à bacia hidrográfica do rio do Peixe, e ainda à elevada quantidade de resultados obtidos, a análise final e conclusões estão divididas em 5 tópicos, abaixo relacionados:

1. **Versatilidade do sistema/modelo** – Pelo fato do sistema se apoiar sobre um modelo hidrológico distribuído, que simula o balanço hídrico dos reservatórios superficiais durante a fase de simulação do ciclo hidrológico, tem-se um sistema que pode utilizar de várias informações para esta simulação. Isto foi visto no caso da calibração da zona hidrológica homogênea Outros Solos com os dados do açude Lagoa do Arroz, onde se tinham todo o histórico da operação mensal deste açude. Porém, a versatilidade do sistema e do modelo ficam bem melhor caracterizadas no momento em que for necessário gerar vazões em um determinado ponto, para assim poder, por exemplo, analisar quantitativamente estas vazões para efeito de outorga. Para tanto, basta inserir um elemento hidráulico, que a simulação integrada da bacia hidrográfica irá permitir que o usuário tenha acesso a diversas informações e resultados para o ponto requerido, sendo os mais importantes: a potencialidade e disponibilidade no elemento hidráulico.
2. **O modelo como instrumento de auxílio ao planejamento e a gestão dos recursos hídricos** – A cobrança pelo uso dos recursos hídricos é uma tendência dominante; mas para que se tenha tal cenário, faz-se necessário a implantação de sistema de informações para as bacias hidrográficas, e através da manipulação dos dados armazenados em tais sistemas, seja possível simular adequadamente o ciclo hidrológico. Assim, por meio da simulação do ciclo hidrológico, passa-se a conhecer o comportamento hidráulico hidrológico da bacia, e por meio dos resultados gerados pela simulação, analisar qual a melhor repartição dos recursos hídricos. Neste ponto é que o modelo AÇUMOD poderá oferecer subsídios ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que ele, considerando a situação hidráulico hidrológica da bacia hidrográfica, a existência ou não de açudes e pontos de captação ao longo do rio, tem a capacidade de gerar e reconstituir vazões no espaço geográfico da bacia, fornecendo, informações quantitativas que servirão para apoiar as tomadas de decisão acerca do uso dos recursos hídricos.

3. **Vantagens da integração de Sistema de Informações Geográfica (SIG) e modelo** – São inúmeras as vantagens da integração de modelos de simulação e SIG's. No caso em estudo esta integração veio a facilitar a entrada dos dados necessários à formação dos arquivos do modelo de transformação chuva X vazão, o AÇUMOD. Com o SIG, pôde-se implantar os açudes, definir a localização exata dos pontos de captação, postos fluviométricos, postos pluviométricos, entre outros elementos da estrutura hidráulica. Tudo isto com as ferramentas do SIG: zoom mais ou menos, pan e principalmente a possibilidade de se associar informações às entidades. Ressaltando a visão integral da bacia hidrográfica e das informações que encontravam-se distribuídas espacialmente sobre a bacia, de fundamental importância para o modelo hidrológico distribuído, que utiliza informações espacialmente distribuídas.
4. **Resultados da calibração e validação do modelo** – Dentre os vários resultados obtidos neste trabalho, um destaque maior é dado à calibração e validação do modelo. O processo de calibração, apesar de manual, não exigiu trabalho em demasia. Para tanto, deve-se seguir uma observação importante: no momento da definição dos pontos de controle para a calibração deve-se optar por pontos cujas suas bacias hidrográficas tenham uma homogeneidade em termos de zona hidrológica, objetivando que os parâmetros de cada zona hidrológica homogênea possam ser calibrados independentemente de outras zonas. Nos processos de calibração e validação do modelo, os índices indicadores da qualidade da calibração e validação atestam as qualidades desses 2 processos, e do modelo AÇUMOD. Isto pelo fato desses índices terem sido definidos de maneira a monitorar diversas características das séries de vazões, como é o caso do PBias que é um indicativo do comportamento das vazões médias; já a diferença relativa entre os volumes escoados superficialmente, calculado e observado, dá uma idéia de todo o comportamento da série (vazões máximas, médias e mínimas). Outro fator de grande importância sobre a calibração e validação do modelo diz respeito aos 2 períodos utilizados no estudo, uma vez que no período da calibração do modelo (1994/1999) tem-se a bacia hidrográfica explorada de maneira intensa, o que não ocorre no período de validação (1963/1972), o que mostra a necessidade da simulação do balanço hídrico dos açudes juntamente com a simulação do ciclo hidrológico, uma vez que estes promovem mudanças nas vazões dos rios e riachos simulados. Importante é salientar que na calibração, chega-se rapidamente ao valor do volume escoado superficialmente, trabalhando-se apenas com os parâmetros DCRT e CRT. O modelo AÇUMOD, diferentemente de outros modelos, realiza primeiro e

separadamente o cálculo da quantidade de água que será disponibilizada para a geração dos escoamentos superficial e de base.

5. **Necessidade de cautela na utilização dos resultados** – Mesmo com o êxito conseguido nos processos de calibração e validação do modelo, deve-se ter certa cautela na utilização dos resultados, pois, estes são saídas de um sistema concebido por técnicos de maneira a simplificar o ciclo hidrológico. Para tanto, criou-se uma estrutura baseada em reservatórios fictícios e equações, que de maneira simplificada, simula o fenômeno natural do escoamento superficial, a vazão. Dentre outros limites para a utilização dos resultados de modelos deste tipo, tem-se a questão da extensão das séries utilizadas no processo de calibração, uma vez que estas, geralmente, não ultrapassam 10 anos, não registrando em geral, situações extremas, como secas severas e/ou cheias intensas, de maneira que os parâmetros não são quantificadas levando-se em conta tais situações. Ainda sobre estas séries, deve-se lembrar que muitos erros de medição não são detectáveis, e caso sejam, mesmo com correções não se tem os valores verdadeiros. Sobre a representatividade dos dados de entrada, tem-se a questão das séries pluviométricas. Mais extensas que as fluviométricas é verdade, porém, muitas vezes não representam a distribuição espacial correta, existente na bacia hidrográfica. Assim, para que se tenha boa resposta dos modelos distribuídos chuva-vazão são necessárias algumas medidas de planejamento hidrométrico, esta indo desde a verificação da necessidade de implantação de novos postos pluviométricos, até a medição de vazões no período seco, buscando-se caracterizar melhor a curva de recessão das vazões, e assim comparar estas com as vazões calculadas para o mesmo período. Essas ações são importantes para quantificar os erros cometidos pelos modelos concentrados ou distribuídos, e para se propor modificações em suas estruturas, objetivando sempre a melhoria da simulação do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica.

7.0 – CONCLUSÕES

A conclusão sobre este trabalho pode ser dividida em 2 fases: uma primeira sobre o modelo e outra sobre a simulação na bacia hidrográfica do rio do Peixe. O modelo mostrou-se adequado a simulações com vistas ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que este considera as várias características hidrológicas e de infra-estrutura hidráulica que influenciam na geração dos escoamentos, como por exemplo, a precipitação espacializada sobre a bacia hidrográfica, ou mesmo a operação sobre os reservatórios superficiais da mesma. Com este modelo podem ser analisadas as conseqüências de modificações na estrutura hidráulica da bacia ou de modificação sobre as demandas, guardando a visão integrada da bacia hidrográfica.

No que diz respeito à simulação realizada na bacia do rio do Peixe, esta apresentou bons resultados, conclusão obtida a partir dos *índices indicadores de qualidade da calibração* (IIQC) e *validação* (IIQV). Vale ainda ressaltar que estes índices (IIQC e IIQV) foram obtidos a partir de simulações realizadas em períodos bem distintos, tendo uma diferença de mais de 20 anos entre a fase de calibração (1994 – 1999) e a fase de validação (1963 – 1972), períodos estes com usos de recursos hídricos e infra-estrutura instalada muito diferente, dentro da bacia hidrográfica.

Apesar dos bons resultados obtidos vale lembrar que o modelo por ser conceitual não pode ser utilizado para a avaliação de modificações sobre o uso dos solos, porém com modificações na estrutura do modelo poderia-se chegar ao ponto da avaliação de tais impactos, ou seja, futuramente pode-se, facilmente, inserir equações com um embasamento físico de maneira a torna o modelo mais adequado a utilização para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

ANEXOS

ANEXO 1

NÍVEIS OBSERVADOS NOS AÇUDES
LAGOA DO ARROZ E ARROJADO

Níveis do açude Lagoa do Arroz.

Período	Nív. Obs. (m)
Jan/95	86,49
Fev/95	86,36
Mar/95	87,7
Abr/95	93,81
Mai/95	94,33
Jun/95	94,27
Jul/95	94,09
Ago/95	93,74
Set/95	92,39
Out/95	89,53
Nov/95	89,46
Dez/95	88,59
Jan/96	90,3
Fev/96	90,88
Mar/96	92,36
Abr/96	97,33
Mai/96	99,86
Jun/96	99,76
Jul/96	99,56
Ago/96	99,2
Set/96	98,59
Out/96	97,94
Nov/96	97,37
Dez/96	96,88
Jan/97	97,37
Fev/97	97,52
Mar/97	98,37
Abr/97	99,26
Mai/97	99,48
Jun/97	99,31
Jul/97	98,9
Ago/97	98,28
Set/97	97,66
Out/97	96,73
Nov/97	95,67
Dez/97	94,96
Jan/98	95
Fev/98	95
Mar/98	95,25
Abr/98	95,27
Mai/98	94,93
Jun/98	93,82
Jul/98	93,11
Ago/98	92,88
Set/98	92,49

Out/98	91,89
Nov/98	91,52
Dez/98	91,23
Jan/99	91
Fev/99	91,04
Mar/99	92,73
Abr/99	93,2
Mai/99	93,47
Jun/99	93,19
Jul/99	92,88
Ago/99	92,63
Set/99	92,2
Out/99	91,89
Nov/99	91,67
Dez/99	91,44

Níveis do açude Arrojado.

Período	Nív. Obs. (m)
Mar/96	41,48
Abr/96	43,6
Mai/96	46,16
Jun/96	45,98
Jul/96	45,8
Ago/96	45,62
Set/96	45,29
Out/96	44,95
Nov/96	44,6
Dez/96	44,27
Jan/97	44,58
Fev/97	44,53

ANEXO 2

FICHAS TÉCNICAS DOS AÇUDES

ESTUDADOS

AÇUDE ARROJADO

	Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Bacia hidrográfica		36,00	0	0
Curso barrado		37,00	4.320	2.320
Município	Uiraúna	38,00	29.200	19.080
Origem da Ficha				
Latitude	06°30'S	39,00	67.600	67.480
Longitude	38°24'W	40,00	147.440	175.000
Latitude (UTM - Km)	9.280,25	41,00	187.280	342.360
Longitude (UTM - Km)	564,83	42,00	259.160	565.580
Volume máximo (m3)*	3.569.180,00	43,00	349.760	870.040
Volume morto (m3)*	67.500,00	44,00	438.000	1.263.920
Barragem		45,00	507.360	1.736.600
Altura (m)	13,70	46,00	573.400	2.276.980
Comprimento (m)	206,00	47,00	634.600	2.907.780
Material	Terra	48,00	688.200	3.569.180
Vertedor				
Largura (m)	40,00			
Material	Natural			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)				
Cota mínima (m)				
Cota do Porão (m)				
Outras Informações				
Início de construção	-			
Conclusão de construção	-			
Finalidade	Abastecimento humano			
Área bac.hidráulica (ha)	132,28			
Área bac.hidrográfica (km2)	42,50			
Classif. água para abastec.	-			
Classif. água para irrigação	C ₁ S ₁			
Existe curva cota/área/vol.	Não			
K*	3.200,00			
Alfa*	2,85			

Executor

Proprietário

Observação: * valores estimados.

AÇUDE CACHOEIRA DA VACA

	Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Bacia hidrográfica				
Curso barrado	Cachoeira dos Índios	15,00	0	0
Município	Cachoeira dos Índios	16,00	3.600	1.843
Origem da Ficha	CAGEPA/SUPLAN	17,00	9.600	8.416
Latitude	06° 57'S	18,00	15.600	21.016
Longitude	38° 40'W	19,00	26.600	41.816
Latitude (UTM - Km)	9.230,99	20,00	45.240	77.436
Longitude (UTM - Km)	535,11	21,00	60.000	130.056
Volume máximo (m3)	339.156,00	22,00	107.600	213.836
Volume morto (m3)	21.016,00	23,00	143.000	339.156
Barragem		24,00	185.000	503.156
Altura (m)	10,00	25,00	238.000	714.636
Comprimento (m)	-			
Material	-			
Vertedor				
Largura (m)	-			
Material	-			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)	23,00			
Cota mínima (m)	15,00			
Cota do Porão (m)	18,00			
Outras Informações				
Início de construção	-			
Conclusão de construção	-			
Finalidade	Abastecimento Humano			
Área bac.hidráulica (ha)	14,30			
Área bac.hidrográfica (km2)	8,03			
Classif. água para abastec.	Potabilizável			
Classif. água para irrigação	C1S1			
Existe curva cota/área/vol.	Sim			
K	580,00			
Alfa	3,05			

Executor SRH-PB
 Proprietário CAGEPA
 Observação: abastece Cachoeira dos Índios.

AÇUDE VÁRZEA DA CRUZ (CALDEIRÃO)

		Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Bacia hidrográfica	Peixe			
Curso barrado	-	90,00	2.600	433
Município	Santa Cruz	91,00	7.080	5.273
Origem da Ficha	CAGEPA	92,00	16.800	17.213
Latitude	06°31'S	93,00	28.400	39.813
Longitude	38°04'W	94,00	44.480	76.253
Latitude (UTM - Km)	9.279,03	95,00	57.680	127.333
Longitude (UTM - Km)	602,83	96,00	73.240	192.793
Volume máximo (m3)	508.433,00	97,00	91.680	275.253
Volume morto (m3)	76.253,00	98,00	116.240	379.213
Barragem		99,00	142.200	508.433
Altura (m)	10,50	100,00	167.400	663.233
Comprimento (m)	-			
Material	Terra			
Vertedor				
Largura (m)	11,00			
Material	-			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)	99,00			
Cota mínima (m)	90,00			
Cota do Porão (m)	94,00			
Outras Informações				
Início de construção	-			
Conclusão de construção	-			
Finalidade	Abastecimento Humano			
Área bac.hidráulica (ha)	14,22			
Área bac.hidrográfica (km2)	2,20			
Classif. água para abastec.	-			
Classif. água para irrigação	-			
Existe curva cota/área/vol.	Sim			
K	3.024,00			
Alfa	2,33			

Executor SUPLAN
 Proprietário CAGEPA
 Observação: abastece Santa Cruz.

AÇUDE CHUPADOURO

		Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Bacia hidrográfica	Peixe	85,00	0	0
Curso barrado		86,00	100	50
Município	Antenor Navarro	87,00	3.800	2.000
Origem da Ficha	CAGEPA	88,00	16.000	11.900
Latitude	06°42'S	89,00	34.000	36.900
Longitude	38°28'W	90,00	94.800	101.300
Latitude (UTM - Km)	9.258,99	91,00	151.800	224.600
Longitude (UTM - Km)	558,32	92,00	220.200	410.600
Volume máximo (m3)	2.764.100,00	93,00	291.400	666.400
Volume morto (m3)	224.600,00	94,00	385.000	1.004.600
Barragem		95,00	517.200	1.455.700
Altura (m)	3,50	96,00	642.400	2.035.500
Comprimento (m)	170,00	97,00	814.800	2.764.100
Material	Terra	98,00	990.200	3.666.600
Vertedor		99,00	1.178.200	4.750.800
Largura (m)	58,00			
Material	-			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)	97,00			
Cota mínima (m)	85,00			
Cota do Porão (m)	90,50			
Outras Informações				
Início de construção	-			
Conclusão de construção	-			
Finalidade	Abastecimento Humano			
Área bac.hidráulica (ha)	81,48			
Área bac.hidrográfica (km2)	19,90			
Classif. água para abastec.	Potabilizável			
Classif. água para irrigação	C1S1			
Existe curva cota/área/vol.	Sim			
K	1.350,00			
Alfa	3,05			

Executor SRH
 Proprietário CAGEPA
 Observação: abastece Antenor Navarro.

AÇUDE DIVINÓPOLIS

Bacia hidrográfica	Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Curso barrado		92,00	2.750	
Município	Cajazeiras	93,00	15.500	91.250
Origem da Ficha		94,00	75.750	54.750
Latitude	06°52'S	95,00	153.000	169.125
Longitude	38°25'W	96,00	270.750	381.000
Latitude (UTM - Km)	9.240,86	97,00	431.000	731.875
Longitude (UTM - Km)	563,95	98,00	624.000	1.259.375
Volume máximo (m3)	360.000,00	99,00	808.750	1.975.750
Volume morto (m3)	-	100,00	1.014.500	2.887.375
Barragem				
Altura (m)	6,00			
Comprimento (m)	300,00			
Material	Aterro barragem			
Vertedor				
Largura (m)	-			
Material	-			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)	-			
Cota mínima (m)	-			
Cota do Porão (m)	-			
Outras Informações				
Início de construção	-			
Conclusão de construção	-			
Finalidade	Abastecimento Animal, Irrigação			
Área bac.hidráulica (ha)	-			
Área bac.hidrográfica (km2)	25,50			
Classif. água para abastec.	-			
Classif. água para irrigação	C ₁ S ₁			
Existe curva cota/área/vol.	Não			
K	-			
Alfa	-			

Executor

Proprietário

Observação:

AÇUDE GAMELA

		Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Bacia hidrográfica	Peixe			
Curso barrado	Riacho Gamelas	40,00	0	0
Município	Triunfo	41,00	2.918	1.459
Origem da Ficha	CAGEPA/SUPLAN	42,00	6.187	6.012
Latitude	06°34'S	43,00	12.451	15.331
Longitude	38°36'W	44,00	18.327	30.720
Latitude (UTM - Km)	9.273,25	45,00	24.008	51.887
Longitude (UTM - Km)	543,39	46,00	31.751	79.777
Volume máximo (m3)	472.926,00	47,00	39.572	115.428
Volume morto (m3)	30.720,00	48,00	48.911	159.670
Barragem		49,00	61.089	214.670
Altura (m)	14,40	50,00	75.292	282.860
Comprimento (m)	185,00	51,00	95.292	368.152
Material	Terra	52,00	112.996	472.296
Vertedor				
Largura (m)	17,40			
Material	-			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)	52,00			
Cota mínima (m)	40,00			
Cota do Porão (m)	40,00			
Outras Informações				
Início de construção				
Conclusão de construção				
Finalidade	Abastecimento Humano			
Área bac.hidráulica (ha)	11,30			
Área bac.hidrográfica (km2)	10,77			
Classif. água para abastec.	Potabilizável			
Classif. água para irrigação	C1S1			
Existe curva cota/área/vol.	Sim			
K	1.300,00			
Alfa	2,35			

Executor CAGEPA

Proprietário CAGEPA

Observação: abastece Triunfo.

Existe descarga de fundo.

AÇUDE LAGOA DO ARROZ

Bacia hidrográfica	Rio do Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Curso barrado	Riacho Cacaré	77,00	0	0
Município	Cajazeiras	78,00	7.500	3.750
Origem da Ficha	DNOCS/CAGEPA	79,00	80.000	47.500
Latitude	06°48'S	80,00	172.500	173.750
Longitude	38° 33'W	81,00	240.500	390.250
Latitude (UTM - Km)	9.248,33	82,00	304.000	652.500
Longitude (UTM - Km)	548,25	83,00	359.000	984.000
Volume máximo (m3)	80.220.750,00	84,00	487.000	1.407.000
Volume morto (m3)	2.561.000,00	85,00	592.000	1.946.500
Barragem		86,00	637.000	2.561.000
Altura (m)	30,00	87,00	761.250	3.260.125
Comprimento (m)	600,00	88,00	953.500	4.117.500
Material	Terra	89,00	1.221.000	5.204.750
Vertedor		90,00	1.673.000	6.651.750
Largura (m)	80,00	91,00	2.060.000	8.518.250
Material	Natural	92,00	2.509.500	10.803.000
Tipo	Canal escavado (soleira espessa)	93,00	3.212.000	13.663.750
Cota da soleira (m)	102,00	94,00	4.703.000	17.621.250
Cota mínima (m)	77,00	95,00	4.945.500	22.445.500
Cota do Porão (m)	86,00	96,00	5.420.600	27.628.250
Outras Informações		97,00	6.237.500	33.457.000
Início de construção	Dez/83	98,00	7.318.000	40.234.700
Conclusão de construção	Dez/87	99,00	8.570.500	48.179.000
Finalidade	Irrigação, Piscicultura, Perenização	100,00	10.245.500	57.587.000
	Abastecimento	101,00	11.369.000	68.394.250
Área bac.hidráulica (ha)	1.228,40	102,00	12.284.000	80.220.750
Área bac.hidrográfica (km2)	327,00	103,00	13.616.500	93.171.000
Classif. água para abastec.	-	104,00	13.257.500	107.607.750
Classif. água para irrigação	-			
Existe curva cota/área/vol.	Sim			
K	2.605,00			
Alfa	3,15			

Executor DNOCS

Proprietário DNOCS

Observação: abastece Santa Helena.

Vazão Regularizada de 330 l/s.

AÇUDE PILÕES

Bacia hidrográfica	Rio do Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Curso barrado	Riacho Triunfo	250,00	0	0
Município	São João do Rio do Peixe	252,00	-	33.000
Origem da Ficha	DNOCS	254,00	371.300	471.000
Latitude	06° 41'S	256,00	2.025.000	3.306.000
Longitude	38° 31'W	258,00	4.834.000	13.000.000
Latitude (UTM - Km)	9.260,01			
Longitude (UTM - Km)	553,38			
Volume máximo (m3)	13.000.000,00			
Volume morto (m3)	1.890.000,00			
Barragem				
Altura (m)	11,00			
Comprimento (m)	150,00			
Material	Terra			
Vertedor				
Largura (m)	160,00			
Material	Concreto			
Tipo	Vertedouro			
Cota da soleira (m)	258,00			
Cota mínima (m)	250,00			
Cota do Porão (m)	255,00			
Outras Informações				
Início de construção	1932			
Conclusão de construção	1933			
Finalidade	Piscicultura, Abastecimento Humano, Irrigação			
Área bac.hidráulica (ha)	483,40			
Área bac.hidrográfica (km2)	952,00			
Classif. água para abastec.	Potabilizável			
Classif. água para irrigação	C ₁ S ₁			
Existe curva cota/área/vol.	Sim			
K	528,30			
Alfa	4,87			

Executor DNOCS
 Proprietário DNOCS
 Observação: abastece São João do Rio do Peixe.

AÇUDE ROÇA NOVA

Bacia hidrográfica	Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Curso barrado		6,00	354.459	756.852
Município	Lastro	7,00	468.532	1.167.163
Origem da Ficha		8,00	596.630	1.698.592
Latitude	06°32'S	9,00	738.399	2.364.981
Longitude	38°10'W	10,00	893.537	3.179.847
Latitude (UTM - Km)	9.276,77			
Longitude (UTM - Km)	590,31			
Volume máximo (m3)*	3.200.000,00			
Volume morto (m3)*	480.000,00			
Barragem				
Altura (m)*	12,00			
Comprimento (m)	600,00			
Material	Terra			
Vertedor				
Largura (m)	15,00			
Material	Natural			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)				
Cota mínima (m)				
Cota do Porão (m)				
Outras Informações				
Início de construção	1940			
Conclusão de construção	1940			
Finalidade	Irrigação			
Área bac.hidráulica (ha)*	89,00			
Área bac.hidrográfica (km2)	20,00			
Classif. água para abastec.	-			
Classif. água para irrigação	C ₁ S ₁			
Existe curva cota/área/vol.	Não			
K*	4.925,00			
Alfa*	2,81			

Executor

Proprietário Maria Sarmento

Observação: * valores estimados.

AÇUDE SANTA HELENA

Bacia hidrográfica	Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Curso barrado		6,00	0	-
Município	Santa Helena	7,00	2.120	1.060
Origem da Ficha	CAGEPA	8,00	20.840	12.540
Latitude	06°44'S	9,00	34.440	40.180
Longitude	38°38'W	10,00	74.200	94.500
Latitude (UTM - Km)	9.255,33	11,00	128.240	195.720
Longitude (UTM - Km)	539,64	12,00	203.440	361.560
Volume máximo (m3)	871.500,00	13,00	258.960	592.760
Volume morto (m3)	40.180,00	14,00	298.520	871.500
Barragem		15,00	339.520	1.190.520
Altura (m)	10,00			
Comprimento (m)	160,00			
Material	Terra			
Vertedor				
Largura (m)	20,00			
Material	Terra			
Tipo				
Cota da soleira (m)	14,00			
Cota mínima (m)	6,00			
Cota do Porão (m)	9,00			
Outras Informações				
Início de construção				
Conclusão de construção				
Finalidade	Abastecimento Humano			
Área bac.hidráulica (ha)	29,85			
Área bac.hidrográfica (km2)	6,00			
Classif. água para abastec.	Potabilizável			
Classif. água para irrigação	C ₁ S ₁			
Existe curva cota/área/vol.	Sim			
K	33.410,00			
Alfa	1,88			

Executor SUPLAN
 Proprietário CAGEPA
 Observação: abastece Santa Helena.

AÇUDE SANTO ANTÔNIO I

		Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Bacia hidrográfica	Peixe	0,30	9.869	45.655
Curso barrado		1,30	14.707	50.889
Município	Cajazeiras	2,30	25.713	63.956
Origem da Ficha		3,30	42.016	90.513
Latitude	06°53'S	4,30	63.214	135.641
Longitude	38°29'W	5,30	89.045	204.099
Latitude (UTM - Km)	9.237,69	6,30	119.316	300.422
Longitude (UTM - Km)	556,17	7,30	153.874	428.972
Volume máximo (m3)*	1.340.000,00	8,30	192.598	593.979
Volume morto (m3)*	201,00	9,30	235.383	799.554
Barragem		10,30	282.141	1.049.716
Altura (m)*	13,00	11,30	332.791	1.348.398
Comprimento (m)	1.000,00			
Material	Terra			
Vertedor				
Largura (m)	55,00			
Material	Concreto			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)				
Cota mínima (m)				
Cota do Porão (m)				
Outras Informações				
Início de construção				
Conclusão de construção				
Finalidade	Irrigação, Abastecimento Humano e Animal			
Área bac.hidráulica (ha)	33,00			
Área bac.hidrográfica (km2)	132,20			
Classif. água para abastec.	-			
Classif. água para irrigação	C1S1			
Existe curva cota/área/vol.	Não			
K*	1.466,00			
Alfa*	2,81			

Executor

Proprietário

Observação: * valores estimados.

AÇUDE SÃO FRANCISCO

		Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Bacia hidrográfica	Peixe	5	0	0
Curso barrado		6	105.510	225.288
Município	Sousa	7	139.465	347.423
Origem da Ficha	CAGEPA	8	177.595	505.611
Latitude	06°37'S	9	219.795	703.972
Longitude	38°05'W	10	265.974	946.529
Latitude (UTM - Km)	9.268,04			
Longitude (UTM - Km)	599,67			
Volume máximo (m3)*	1.000.000,00			
Volume morto (m3)*	150.000,00			
Barragem				
Altura (m)	6,00			
Comprimento (m)				
Material	Terra			
Vertedor				
Largura (m)	14,00			
Material	Concreto			
Tipo	Creager			
Cota da soleira (m)	-			
Cota mínima (m)	-			
Cota do Porão (m)	-			
Outras Informações				
Início de construção	1984			
Conclusão de construção	1940			
Finalidade	Abastecimento Humano			
Área bac.hidráulica (ha)				
Área bac.hidrográfica (km2)	4,40			
Classif. água para abastec.	-			
Classif. água para irrigação	C1S1			
Existe curva cota/área/vol.	Não			
K*	1.466,00			
Alfa*	2,81			

Executor 1º. Grup. de Engenharia

Proprietário

Observação: * valores estimados.

AÇUDE SERRA BRANCA

Bacia hidrográfica	Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Curso barrado		5,00	525.076	934.299
Município	Sousa	6,00	730.365	1.559.500
Origem da Ficha		7,00	965.415	2.404.949
Latitude	06°33'S	8,00	1.229.361	3.499.961
Longitude	38°15'W			
Latitude (UTM - Km)	9.275,45			
Longitude (UTM - Km)	582,30			
Volume máximo (m3)*	3.500.000,00			
Volume morto (m3)*	525.000,00			
Barragem				
Altura (m)	4,00			
Comprimento (m)	600,00			
Material	Terra			
Vertedor				
Largura (m)	-			
Material	Pedra			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)	-			
Cota mínima (m)	-			
Cota do Porão (m)	-			
Outras Informações				
Início de construção	1880			
Conclusão de construção	1880			
Finalidade	Abastecimento Humano, Lavagem de Roupa, Irrigação			
Área bac.hidráulica (ha)	123,00			
Área bac.hidrográfica (km2)	59,30			
Classif. água para abastec.	-			
Classif. água para irrigação	C1S1			
Existe curva cota/área/vol.	Não			
K*	10.148,00			
Alfa*	2,81			

Executor

Proprietário Antônio Dantas

Observação: * valores estimados.

AÇUDE SERRA VERMELHA

	Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Bacia hidrográfica		3,00	30.090	32.125
Curso barrado		4,00	50.648	72.097
Município	Cajazeiras	5,00	75.853	134.970
Origem da Ficha		6,00	105.510	225.288
Latitude	06°56'S	7,00	139.465	347.423
Longitude	38°35'W	8,00	177.595	505.611
Latitude (UTM - Km)	9.231,79	9,00	219.795	703.972
Longitude (UTM - Km)	544,79	10,00	265.974	946.529
Volume máximo (m3)*	2.000.000,00	11,00	316.053	1.237.221
Volume morto (m3)*	300.000,00	12,00	369.963	1.579.913
Barragem		13,00	427.639	1.978.403
Altura (m)	14,00			
Comprimento (m)	200,00			
Material	Terra			
Vertedor				
Largura (m)	13,00			
Material	Natural			
Tipo	-			
Cota da soleira (m)				
Cota mínima (m)				
Cota do Porão (m)				
Outras Informações				
Início de construção	-			
Conclusão de construção	-			
Finalidade	Irrigação, Abastecimento Humano e Animal			
Área bac.hidráulica (ha)	42,70			
Área bac.hidrográfica (km2)	12,50			
Classif. água para abastec.	-			
Classif. água para irrigação	C1S1			
Existe curva cota/área/vol.	Não			
K*	1.466,00			
Alfa*	2,81			

Executor

Proprietário

Observação: * valores estimados.

AÇUDE SOUSA MACIEL

Bacia hidrográfica	Rio do Peixe	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
Curso barrado	Riacho Cachoeirinha	86,00		
Município	Cajazeiras	87,00	1.728	864
Origem da Ficha	DNOCS	88,00	4.608	4.032
Latitude	06° 50'S	89,00	13.632	13.152
Longitude	38° 30'W	90,00	30.912	35.424
Latitude (UTM - Km)	9.243,06	91,00	46.656	74.208
Longitude (UTM - Km)	553,48	92,00	69.312	132.192
Volume máximo (m3)	914.808,00	93,00	91.296	212.496
Volume morto (m3)	24.288,00	94,00	118.560	317.424
Barragem		95,00	148.704	451.056
Altura (m)	13,45	96,00	174.336	612.576
Comprimento (m)	190,00	97,00	206.112	802.800
Material	Terra	98,00	241.920	1.026.816
Vertedor		99,00	273.792	1.284.672
Largura (m)	14,00	100,00	307.776	1.575.456
Material		101,00	340.032	1.899.360
Tipo	Vertedouro	102,00	382.080	2.260.416
Cota da soleira (m)	97,50			
Cota mínima (m)	86,00			
Cota do Porão (m)	89,50			
Outras Informações				
Início de construção	29/11/58			
Conclusão de construção	10/12/62			
Finalidade	Abastecimento			
Área bac.hidráulica (ha)	22,40			
Área bac.hidrográfica (km2)	3,34			
Classif. água para abastec.				
Classif. água para irrigação				
Existe curva cota/área/vol.	Sim			
K				
Alfa				

Executor DNOCS (cooperação)
 Proprietário Moisés de Sousa Maciel
 Observação: há 11 anos não sangra.

ANEXOS 3

FORMATAÇÃO DOS ARQUIVOS DE
ENTRADA DO MODELO

Em seguida, tem-se a formatação dos diversos arquivos de entrada do modelo:

- Os arquivos Fic34.mod e Fic44.mod, os quais contém, respectivamente, informações sobre os açudes de ordem 1 e 2. Têm a seguinte estrutura: na primeira linha, uma seqüência com os dias iniciais e finais das possíveis modificações sobre os reservatórios superficiais. Em seguida, para cada açude, os dados da curva cota/área/volume;
- Arquivo com os dados históricos de níveis, para os açudes, e vazões, para os postos fluviométricos: na primeira linha o nome do açude ou o código do posto fluviométrico; nas linhas posteriores, tem-se o ano, o mês, e o valor do nível, em m, ou a vazão em m³/s. Vale salientar que, quando dentro de um período de observação não houver uma leitura, será colocado o valor padrão '-99.0'. O nome atribuído a estes arquivos é formado pela letra 'M', a qual indica que os dados são mensais, seguido do código do posto fluviométrico ou do número de ordem do açude, mais a extensão vaz ou niv, indicando, respectivamente, os arquivos dos postos fluviométricos e dos níveis dos açudes.
- Arquivo com os dados de precipitação diária: Na primeira linha, tem-se a indicação do código e nome do posto. Nas seguintes, tem-se o ano e o mês seguido dos valores diários de precipitação, finalizando com a média mensal. Para os meses que têm 28, 29 ou 30 dias deve-se colocar o valor '-99.0', aos dias inexistentes.
- Arquivo com os dados de precipitação mensal: Na primeira linha, tem-se a indicação do código e nome do posto. Na segunda linha, tem-se o cabeçalho da tabela indicando que nas linhas seguintes têm-se os anos seguidos dos 12 valores de precipitações mensais.

Estes 2 últimos arquivos têm o seguinte nome: a letra 'D' ou 'M', para indicar que o arquivo foi corrigido diariamente ou mensalmente, seguido do código do posto, mais a extensão dir ou mes, indicando se os dados são diários ou mensais.

- Arquivo com a lista de postos pluviométricos que são utilizados para traçado do Thiessen: Este arquivo contém as seguintes informações: na primeira linha, um texto indicando o nome da bacia em estudo; na linha seguinte, um texto que expressa que na linha seguinte tem-se a quantidade de posto que serão utilizados para o traçado do polígono de

Thiessen; em seguida um texto que mostra que na próxima linha tem-se o período dos dados de precipitação, mês e ano inicial e final; na sexta linha o cabeçalho de uma lista de informações sobre os postos pluviométricos e nas linhas posteriores, as seguintes informações:

- Código do posto pluviométrico;
- Latitude, em km;
- Longitude, em km;
- Altitude, em m;
- Nome do posto pluviométrico.

- arquivo de dados de evapotranspiração tem a seguinte estrutura: Primeira linha: título do estudo ou qualquer outra *string*; A segunda linha deverá ficar em branco; Na terceira linha tem-se o cabeçalho da tabela de dados de evapotranspiração; As próximas linhas são tantas quantas forem os números de postos pluviométricos, sendo que, em cada uma delas, tem-se o código do posto evaporimétrico seguido dos 12 valores de evapotranspiração médias diárias para cada mês, em mm;
- Arquivo de retiradas e liberações: Primeiras linhas do arquivo: números de operação dos açudes, postos fluviométricos e captações; Em seguida, tem-se os valores de retiradas e liberações, em l/s, para os elementos da estrutura hidráulica citados anteriormente, sendo que estes devem estar na mesma ordem dos números de operação das primeiras linhas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEY, W. M., (1984). On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models, *Water Resources Research*, v. 20, p. 1137-1149.
- ALMEIDA, C.N.; ALBUQUERQUE, D.J.S.; PAIVA, A.E.D.B.; PASSERAT DE SILANS, A.M.B. (1999). Sapo - Um Sistema De Apoio Ao Planejamento E Gerenciamento Dos Recursos Hídricos, Anais eletrônico do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Novembro, 1999.
- ARNALL, N. W. (1992). Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment, *Journal of hydrology*, v. 132, p. 321-342.
- AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; PORTO, M., (1998). Sistema de apoio à decisão para o gerenciamento integrado de quantidade e qualidade da água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n.1, p.21-52, Janeiro/Março.
- ARAÚJO FILHO, P. F., (1992). OMEGA, Modelo de formulação não-linear dos processos hidrológicos, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- ARAÚJO FILHO, P.F.; MOURA, A.R.L.U. (1998). Modelagem hidrológica utilizando sensoramento remoto: metodologia. Anais eletrônico do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.
- BRASIL, Leis, etc. (1997). *Lei Federal Nº 9433/97*, Art. 5º §I a VI.
- BLANEY H. F. & CRIDDLE, W.D.; (1952). Determining water requirement in irrigated area from climatological under irrigation data. Washinton USDA: Soil Conservation Service, 1952 - 96p.
- BOUGHTON, W. C., (1973). A mathematical catchment model for estimating runoff, *Journal of Hydrology*, v. 3, n.1, p.75-100.
- CEOTTO, F.; LUCCHETTI, S; GIRARD, G.; JACCON, G. (1983). Aplicação do modelo SIMMQUE à bacia do Rio Paraíba do Sul. Anais do V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, V. 2, p. 229-262.
- CHIEW, S. H. F.; STEWARDSON, J. M.; McMAHON, A.T. (Junho, 1993). Coparison of six rainfall-runoff modelling approaches, *Journal of Hydrology*, v. 147, n. 1-4, p.1-36.
- DINIZ, L. S., (1994). Calibração automática de modelos chuva-vazão usando um algoritmo genético. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba. 130 p.

- DNAEE (1983a). *Modelo SIMMEQ – Conceituação*. Ministério das Minas e Energia – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, 87p.
- DNAEE (1983b). *Modelo SIMMEQ – Aplicação à Bacia do Rio Paraíba do Sul*. Ministério das Minas e Energia – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, 87p.
- DEBREUIL, P. (1966). – Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants. Leur détermination avec une précision acceptable. Paris (Cahier Orstom d'hydrologie n.5).
- FIGUEIREDO, E.E.; LOPES, P.L.; SRINIVASAN, V.S. (1998). Influência da discretização da bacia no escoamento simulado com um modelo distribuído. Anais eletrônico do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.
- FILHO, C.O.T.; JÚNIOR, A.L.R.; BALTAR, A.M.; NETTO, M.S.C.C. (1997). Uma metodologia aplicada para cálculo de potencialidades hídricas em bacias hidrográficas. Anais eletrônico do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- FRANCHINI, M, PACCIANI, M. (1963). Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models, *Journal of hydrology*, v.122, p. 161-219.
- GOMES, H. P. (1994). Engenharia de Irrigação – Hidráulica dos sistemas pressurizados: aspersão e gotejamento, Editora Universitária da Paraíba, Paraíba, 344p.
- GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. (1998). Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n.4, p.103-120, Outubro/Dezembro.
- GIRARD, G., (1974). Modèle global ORSTOM. Première application du modèle journalier à discretisation spatiale sur le bassin versant de lodo ativado crique Grégoire en guyane. Technical report, ORSTOM, Paris, Atelier hydrologique sur les modèles mathématiques.
- GÓIS, R.S.S.; SRINIVASAN, V.S.; SILVA, W.A. (1996). Avaliação de alguns modelos determinísticos chuva-vazão em bacias hidrográficas de diferentes regiões do Estado da Paraíba. Anais do III Simpósio Nordestino de Recursos Hídricos, V. 1, p. 559-564.
- GOULA BI TIÉ, A. (1993). Modélisation hydrologique de bassins versants équipés d'ouvrages hydrauliques em zone Soudano-Sahélienne: Application au Massili (Burkina Faso). Tese de doutorado, Ecole des Mines de Paris, 178 p.
- HABETS, F.; NOILHAN, J.; GOLAZ, C.; GOUTORBE, J. P.; LACARRÈRE, P.; LEBLOIS, E.; LEDOUX, E.; MARTIN, E.; OTTLÉ, C.; VIDAL-MADJAR, D.

- (1999). The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area part I: Model and database, *Journal of hydrology*, v. 217, n. 1-2, p.75-96.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A., (1985). Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. Chicago, Amer. Soc. Agric. Eng. Meeting.
- HUGHES, D. A., (1982). Conceptual catchment model parameter transfer studies using monthly data from Southern Cape Coastal lakes Region. Report 1/82, Hydrological Research Unit, Universidade de Rhodes, Grahamstown.
- IBGE (1998). Censo agropecuário 1996-1995, Número 11, Paraíba.
- KLEEGERG, H. B.; OVERLAND, H.; PAUS, G. B., (1989). NAVMO, Version 1.1 Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswerh, Munchen.
- KUCZERA, G. (1983a). Improved parameter inference in catchment models, 1 – evaluating parameter uncertainty, *Water Resources Research*, v. 19, n. 5, p. 1151-1162.
- KUCZERA, G. (1983b). Improved parameter inference in catchment models, 2 – combining different uncertainty, *Water Resources Research*, v. 19, n. 5, p. 1163-1172.
- LANNA, A. E. (1996). MODHAC – Modelo hidrológico auto-calibrável, Manual de utilização, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Rio Grande do Sul, 54 p.
- LEDOUX, E.; GIRARD, G.; DE MARSILLY, G.; DESCHENES, J. (1989). Spatially distributed modeling: conceptual approach, coupling surface water and groundwater NATO. ASI Series C. In: Morel-Seytoux. X. (Ed.). Unsaturated Flow Hydrologic Modeling –theory and Practice, 275, Kluwer Academic, Dordrecht p. 435-454.
- LOPES, J.E.G.; BRAGA, B.P.F.; CONEJO, J.G.L. (1981). Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, v. 1, p. 42-62.
- LINSLEY, R. K.; CRAWFORD, N. H. (1966). Digital Simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV. Stanford: Department of Civil Engineering. *Stanford University Technical Report*. n.39, 210p.
- MEHROTRA, R.; SINGH, R. D. (1998). The Influence of Model Structure on the Efficiency of Rainfall-Runoff Models: A Comparative Study for Some Catchments of Central India, *Water Resources Management*, v. 12, n. 5, p.325-341.

- MENDES, C. A. B. (1996). Integração de modelos hidrológicos e sistema de informações geográficas: fundamentos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.1, n.1, p.48-65, Janeiro/Junho.
- MARWELL, P. F. (1985). Modelo hidrológico mensal para a região semi-árida do Nordeste Brasileiro, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 136p.
- MONTENEGRO, J. P. B. (1990). Caracterização hidrológica da infiltração e do escoamento superficial em uma micro-parcela sem vegetação do Cariri. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 139 p.
- NASH, J. E.; SUCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, 1, a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282-290.
- PAIVA, A.E.D.B.; ALBUQUERQUE, D.J.S.; PASSERAT DE SILANS, A.M.B.; ALMEIDA, C.N. (1999). Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia do Rio Taperoá – Estado da Paraíba. Anais eletrônico do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Novembro, 1999.
- PASSERAT DE SILANS, A.M.B.; ALMEIDA, C.N.; ALBUQUERQUE, D.J.S.; PAIVA, A.E.D.B. (1999). Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do Rio do Peixe – Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*. Ino prelo/
- PASSERAT DE SILANS, A.M.B.; ALMEIDA, C.N.; PAIVA, A.E.D.B.; LEITE, R.A. (1998). Um modelo hidrológico distribuído para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos de regiões semi-áridas. Anais eletrônico do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Campina Grande – PB.
- PENMAN, In Yield Response to water. (1979). FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER, ROME.
- PITMAN, W. V., (1973). Flow generation by catchment models of differing complexity – a comparison of performance, *Journal of Hydrology*, v.38, p.59-70.
- RIGHETTO, A. M. (1998). Hidrologia e Recursos Hídricos, Publicação da Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 840 p.
- ROBERTS, P. J. T. (1979). Model FLEXIFIT: A conceptual rainfall-runoff model for the extension of monthly runoff records. Department of Environment Affairs, Hydrological Research Institute, Tech. Report 98.

- RUTUNNO FILHO, O. C.; SILVA, L. P.; MAGALHÃES, P. C.; DIB, L.A.R.; SOLDAN, C. (1991). Alguns aspectos da modelagem distribuída para bacias hidrográficas. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, V. 2, p. 326-335.
- SALAS, J. D.; TABIOS III, G. Q; OBEYSEKERA, J. T. B. (1986). Seasonal model for watershed simulation, Manual do usuário, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Colorado.
- SANTOS, F. J. L.; MENESES FILHO, A. S. (1998). Incerteza paramétrica do modelo IPH II. Anais eletrônico do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.
- SCHAAKE, J. C. & LIU, C. (1989). Development and application of simple water balance models to understand relationship between climate and water resources, in: M. L. Kavvas (ed.), *New Directions for Surface Water Modeling* (Proceedings of the Baltimore Symposium, Maio, 1989), IAHS Publ. N. 189.
- SCHWARZBACH, M.; LANNA, A.E. (1989). MODHAC: Um modelo hidrológico auto-calibrável para avaliação de disponibilidades hídricas fluviais. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, V. 1, p. 483-496.
- SCIENTEC (1998). Plano Diretor de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte – Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu no Território Paraibano – Estudos Fluviométricos e geração de vazões. v. 3, 21 p.
- SEPLAN / PR – SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (1994). PROJETO ÁRIDAS, Uma Estratégia de Desenvolvimento Sustentável para o Nordeste. GT II Recursos Hídricos (autor: Walter Martins Filho e equipe) Brasília, Setembro de 1994, 26p.
- SEPLAN (1996). Plano Diretor da bacia hidrográfica do Rio do Peixe – Estudos de base. Secretaria do Planejamento do Governo do Estado da Paraíba. Convênio SEPLAN/SCIENTEC. v. 1 e 2.
- SILVEIRA, A. L. L.; DESBORDES, M. (1999). Modelo hidrológico distribuído urbano com poucos parâmetros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.4, n.1, p.35-48, Janeiro/Março.
- SUGAWARA, M. (1979). Automatic calibration of the Tank Model, *Hydrological Science Bulletin*, p. 375-358.
- THORTHWAITE, C. W. (1965). The loss of water to the air. *Meteorological Monog.* v. 28, n. 6, p. 163-180.
- TUCCI, C. E. M. (1987). Modelos hidrológicos para gerenciamento de recursos hídricos, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 395 p.

- TUCCI, C. E. M. (1998). Modelos hidrológicos, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 669 p.
- TUCCI, C. E. M.; SANCHEZ, J.; SIMÕES LOPES, M. (1981). Modelo matemático precipitação-vazão IPH II. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 63 p. (Recursos Hídricos, Publicação n. 3).
- VAN DER BEKEN, A. & BYLOOS, J. (1977). A monthly water balance model including deep infiltration and canal losses, *Hydrol. Sci. Bull.*, v. 22, p. 341-351.
- VANDEWIELE, G. L.; XU, C. Y.; NI-LAR-WIN. (1992). Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma, *Journal of Hydrology*, v. 134, p. 315-347.
- WALLING, D. E. (1983). The sediment delivery problem, *Journal of Hydrology*, v. 65, p. 209-237.
- XU, Y. C.; SINGH, P.V. (1998). A review on monthly water balance models for water resources investigations, *Water Resources Management*, v. 12, n. 1, p.31-49.