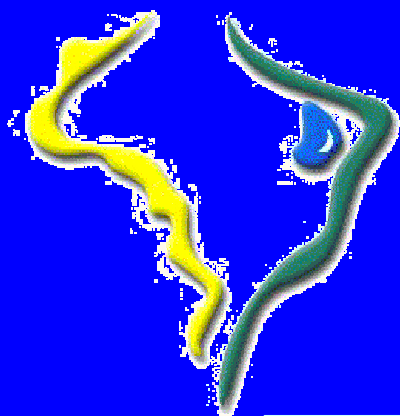


GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA
Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos
Hídricos e Minerais – SEMARH
Unidade Estadual de Gerenciamento do Proágua



PROÁGUA

SEMI-ÁRIDO

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA

Relatório Final de Diagnóstico

TOMO III

Apoio:

BANCO MUNDIAL



Riverside Technology, inc.

SRH/MMA

Julho/2001

APRESENTAÇÃO

APRESENTAÇÃO

O presente documento se constitui no Relatório Final de Diagnóstico do Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia do rio Paraíba (PDRHP), elaborado pelo Consórcio TC/BR Riverside Technology Inc., através do contrato assinado com a SEMARH.

O produto deste relatório, elaborado a partir de um amplo processo de coleta e tratamento de informações hidrológicas, demográficas e sócio - econômicas, encontra-se encadernado em três tomos, o primeiro tomo, constitui-se em um volume único e apresenta 6 capítulos, sendo os anexos apresentados em CD-ROM, o segundo tomo está dividido em três volumes, onde o primeiro volume apresenta 4 capítulos, o segundo volume apresenta um capítulo e o terceiro volume apresenta 3 capítulos, sendo, também, os anexos apresentados em CD-ROM e, finalmente, o terceiro tomo constitui-se em um volume único dividido em 5 capítulos, acompanhado de um CD-ROM onde são disponibilizados os programas utilizados neste tomo.

O terceiro tomo divide-se em cinco capítulos, descritos a seguir:

- Capítulo 1 – MAG1 - relativo à geração de série pseudo-históricas de escoamentos em diferentes locais de interesse, utilizando o modelo de transformação chuva-deflúvio denominado MODHAC;
- Capítulo 2 – MAG2 – relativo à geração de série sintéticas de escoamentos em diferentes locais de interesse, utilizando técnicas estocásticas;
- Capítulo 3 – MAG3 - avaliação de eventos extremos de chuva, com a utilização do PLUEXT, e de seca, utilizando o MUSAG;
- Capítulo 4 – MAG4 - estudo de balanço hídrico com a utilização do Modsim;
- Capítulo 5 – MAG5 – simulação da qualidade dos corpos d'água superficiais, utilizando QUAL2E.

O presente relatório não pretende exaurir metodologicamente os modelos apresentados, limitando-se a esclarecimentos básicos. Para maiores detalhes recomenda-se consultar a bibliografia específica de cada modelo.

Complementa o presente relatório um CD onde são disponibilizados os programas utilizados em cada um dos MAGs apresentados, bem como as aplicações feitas no presente estudo às questões particulares da Bacia do Rio Paraíba.

SUMÁRIO

Sumário

APRESENTAÇÃO	2
LISTA DE FIGURAS, TABELAS E MAPAS	7
INTRODUÇÃO	9
1 - MODELO MAG 1 (MODELO CHUVA-DEFLÚVIO)	12
1.1 - DESCRIÇÃO METODOLÓGICA	13
1.2 – IMPLEMENTAÇÃO DO MAG1	15
2 - MODELO MAG 2 (MODELO DE GERAÇÃO ESTOCÁSTICA)	19
2.1 – OS MODELOS ESTOCÁSTICOS	19
2.1.1 - INTERVALOS DE DISCRETIZAÇÃO DAS SÉRIES	20
2.2 – UM MODELO ESTOCÁSTICO PARA PROCESSO INTERMITENTE	21
2.2.1 - MODELO ESTOCÁSTICO ANUAL	22
2.3 - CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO	24
2.4 - GERAÇÃO ESTOCÁSTICA MULTIVARIADA DE VAZÕES	26
2.4.1 - BASES CONCEITUAIS	26
2.4.2 - COMPONENTES TOPOLÓGICOS DE UMA RNA	27
2.4.3 - O PROCESSO DE APRENDIZADO	28
2.4.4 – ARQUITETURA DAS REDES: DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DAS VAZÕES	29
2.5 – GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DAS VAZÕES PARA OS PONTOS DE INTERESSE NA BACIA	30
2.5.1 – VERIFICAÇÃO DO MODELO	30
2.5.2 – VALIDAÇÃO DO MODELO	31
2.5.3 – DESAGREGAÇÃO ESPACIAL	32
3 - MODELO MAG 3 (MODELOS DE EVENTOS EXTREMOS)	34
3.1 - DESCRIÇÃO METODOLÓGICA	34
3.1.1 – MODELO DE PLUVIOMETRIA EXTREMA (PLUEXT)	34
3.1.1.1 – Distribuições de probabilidade ajustadas	35
3.1.1.2 – Testes de ajuste de distribuições de probabilidade	35
3.1.2 – MODELO DE UMIDADE DO SOLO PARA FINS AGRÍCOLAS (MUSAG)	36
3.2 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAG3	39
3.2.1 - MODELO DE PLUVIOMETRIA EXTREMA (PLUEXT)	39
3.2.2 – MODELO DE UMIDADE DO SOLO PARA FINS AGRÍCOLAS (MUSAG)	40
4 - MODELO MAG 4 (MODELO DE BALANÇO HÍDRICO)	46
4.1 - AVALIAÇÃO DA OFERTA D'ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO	46
4.2 - CONCEITO DE VOLUME DE ALERTA	48

4.3 - SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM RESERVATÓRIO CONSIDERANDO TRANSPOSIÇÃO	49
4.4 - DOMÍNIO DE PESQUISA DA SINERGIA	50
4.5 - PARÂMETROS DE EXPRESSÃO DA SINERGIA	50
4.6 - O MODELO UTILIZADO	54
4.7 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAG4	56
5 - MODELO MAG 5 (MODELO DE QUALIDADE D'ÁGUA)	58
5.1 - DESCRIÇÃO METODOLÓGICA	59
5.2 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAG5	61

LISTA DE FIGURAS, TABELAS E MAPAS

FIGURA

Figura 1.1 – Representação esquemática do modelo MODHAC

Figura 4.1 – Apresentação esquemática da operação considerando volume de alerta

Figura 4.2 – Esquema da operação considerando volume de alerta e transposição

Figura 4.3 – Exemplo de sistema doador - receptor

Figura 5.1 – Discretização da rede de drenagem para simulação do QUAL2E

Figura 5.2 – Perfil de DBO ao longo do Rio Paraíba

TABELAS

Tabela 1.1 - Síntese dos Parâmetros Médios Anuais das Séries Geradas pelo MODHAC p/ os Açudes Estudados

Tabela 5.1 – Caracterização hidráulica dos trechos simulados

Tabela 5.2 – Vazões efluentes sanitárias

MAPAS

Mapa 3.1 - Déficits médios para culturas com ciclo vegetativo de 60 dias

Mapa 3.2 - Déficits médios para culturas com ciclo vegetativo de 90 dias

Mapa 3.3 - Frequência de déficits médios de 30% ciclo de 60 dias

Mapa 3.4 - Frequência de déficits médios de 30% ciclo de 60 dias

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

Os Modelos de Avaliação e Gestão de Recursos Hídricos consistem em ferramentas computacionais independentes, abordando aspectos diversos da avaliação e da gestão hídricas.

A necessidade da utilização desses modelos decorre da própria natureza do gerenciamento hídrico, que agrega uma gama variada de informações, que se relacionam de forma complexa, implicando na necessidade de processamento rápido e confiável de um grande número de variáveis e de uma boa dose de bom senso quando da avaliação e utilização dos resultados obtidos.

Assim, os objetivos de disponibilizar os Modelos de Avaliação e gestão MAG's é, por um lado, apresentar as ferramentas de avaliação dos recursos hídricos utilizadas ao longo dos estudos do Plano Diretor da Bacia do Rio Paraíba e, por outro lado, fornecer recursos para o posterior acompanhamento das ações de gestão a serem implementadas e atualização do próprio Plano Diretor.

A concepção dos MAG's apontou, sempre que possível, a adaptação de ferramentas computacionais já existentes, tendo em vista sua confiabilidade e a possibilidade de análise dos resultados em função de respostas obtidas em estudos anteriores, seja na bacia em estudo ou alhures.

A seleção dos aspectos a serem incorporados nos MAG's abedece ao estabelecido no TDR destes estudos, sendo disponibilizadas as seguintes ferramentas:

- geração de séries de vazões pseudo-históricas em locais de interesse na bacia, utilizando o modelo de transformação chuva-deflúvio denominado MODHAC (Modelo Hidrológico Auto-Calibrável);
- geração de séries de vazões sintéticas em locais de interesse na bacia, utilizando o técnicas estocásticas;
- avaliação de eventos extremos máximos, realizado com o software PLUEXT, ou secas, avaliadas com o modelo MUSAG;
- balanço entre as demandas e disponibilidades hídricas na bacia, utilizando o modelo MODSIM;

- simulação da qualidade dos corpos d'água superficiais, utilizando o modelo QUAL2E.

Cabe ainda acrescentar que a tarefa de implementação dos MAG's, pressupõe um cuidadoso trabalho de preparação e análise dos dados básicos a serem utilizados em cada uma das ferramentas computacionais, que de outra forma ofereceriam respostas equivocadas.

1 - MODELO MAG 1 (MODELO CHUVA-DEFLÚVIO)

A geração de séries pseudo-históricas de vazões é uma das tarefas mais importantes da prática da engenharia de recursos hídricos, determinando, em última instância, a disponibilidade hídrica.

A crônica insuficiência de informações relativas a fluviometria no Nordeste do Brasil, no entanto, torna a utilização imediata das mesmas uma ação inócua, que pouco acrescenta ao conhecimento das condições de escoamento na região.

Por outro lado, é disponível uma quantidade de dados pluviométricos, embora não totalmente satisfatória do ponto de vista espacial e temporal, muito superior aos registros fluviométricos, cabendo então a extensão dos últimos pela utilização de modelos chuva-deflúvio com base nas séries pluviométricas existente.

Nesse sentido adotou-se o MODHAC – Modelo Hidrológico Auto Calibrável¹ para extensão dos registros de fluviometria com base nos dados pluviométricos da bacia, havendo sido apresentada no RP2 a calibração dos parâmetros de tal modelo para as bacias dos postos fluviométricos, não só da Bacia do Rio Paraíba como do resto do estado, para o caso de ser necessária a utilização de parâmetros exógenos à bacia.

Como vantagem da aplicação do MODHAC podemos ainda acrescentar a larga experiência de utilização desse modelo tanto no âmbito regional como nacional. Entre os exemplos de aplicação anterior do MODHAC podemos citar: PERH (Plano Estadual de Recursos Hídricos) do Estado do Ceará, finalizado em 1991, os Planos Diretores das bacias hidrográficas do Estado da Bahia (1991/93), o Plano Diretor de Recursos Hídricos do rio Piranhas, os Planos de Gerenciamento das sub-bacias mineiras do Rio São Francisco e os Estudos de Inserção Regional da Transposição de águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional.

¹ Lanna, A. e Schwarzbach, M., Modelo Hidrológico Autocalibrável. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS.1989.

1.1 - DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

Esquemáticamente o MODHAC pode ser representado como na Figura 1.1. Sua concepção supõe três reservatórios representando os armazenamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo. O processo de cálculo emula um balanço hídrico diário com base na precipitação, na taxa de evaporação e no inter-relacionamento entre os citados reservatórios.

Considera-se o escoamento total formado pelo superficial – resultado do escoamento gerado no reservatório superficial incrementado pelo escoamento aflorante gerado no reservatório sub-superficial – e o subterrâneo – resultante do escoamento de base gerado pelo reservatório sub-superficial acrescido daquele gerado pelo reservatório subterrâneo.

Em outras palavras, o modelo computa os escoamentos diários da série de precipitações médias diárias e da série de evapotranspiração média mensal, esta, porém, tomada com um índice médio invariável ao longo de um determinado mês, bem como a vazão média mensal observada convertida em lâmina sobre a área da bacia.

Quando do processo de calibração dos parâmetros do modelo essa série de lâminas entra como referencial de cálculo para a função-objetivo, a ser otimizada pelo método de Rosebrook bloqueado. O uso dessa técnica objetiva limitar a faixa de variação dos parâmetros a intervalos fisicamente significativos.

O mecanismo do MODHAC é controlado por meio de doze parâmetros, sendo aqueles importantes para a calibração de postos fluviométricos no Nordeste descritos a seguir:

RSPX: capacidade máxima do reservatório superficial, sendo função desta o retardo na resposta do escoamento superficial à ocorrência de chuva, representando todas as retenções, inclusive a ačudagem difusa;

RSSX – capacidade máxima do reservatório subsuperficial, relacionada com a retenção na zona de atividade radicular dos vegetais, atua sobre as perdas por evapotranspiração e alimentação do escoamento em curtos períodos de estiagem;

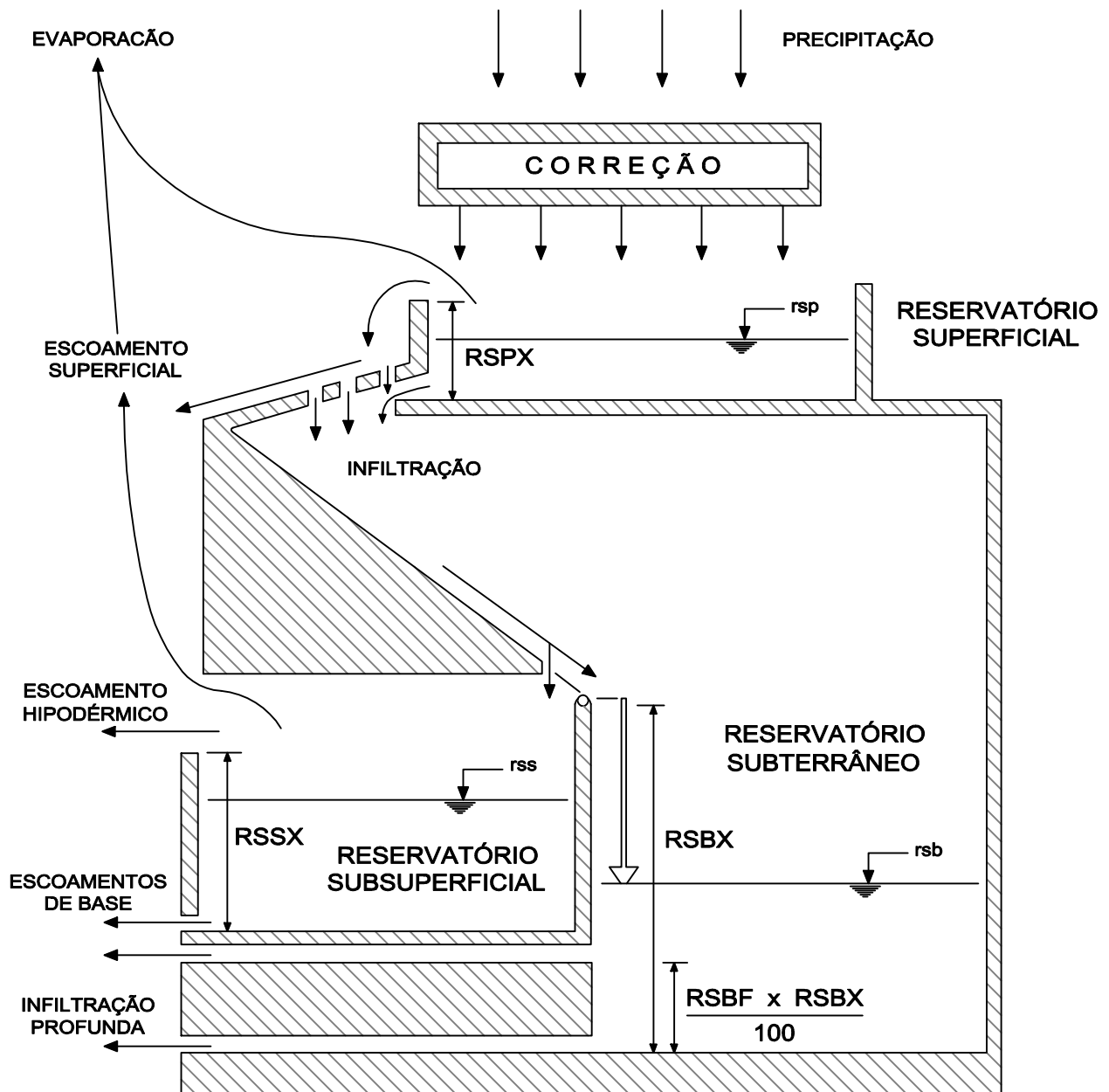


FIGURA 1.1
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO
MODELO MODHAC

RSBX – capacidade máxima do reservatório subterrâneo, esse parâmetro é considerado nulo nas bacias do semi-árido nordestino, de reconhecido substrato cristalino;

IMIN – infiltração mínima; utilizado fundamentalmente para transladar os escoamentos no tempo, e efeito semelhante ao parâmetro RSPX;

IMAX – permeabilidade do solo, proporcional à permeabilidade e função da heterogeneidade dos solos que compõem a área drenada;

IDEC – coeficiente de infiltração, intervém na relação entre os parâmetros IMIN e IMAX;

ASB – expoente da lei de esvaziamento do reservatório subterrâneo, influenciando na calibração do modelo somente no caso de RSBX diferente de zero;

CEVA – parâmetro da lei de evapotranspiração do solo (varia entre 0 e 1), sua elevação determina maiores perdas por evapotranspiração;

ASP – expoente da lei de esvaziamento do reservatório superficial;

ASS – expoente da lei de esvaziamento do reservatório superficial.

1.2 – IMPLEMENTAÇÃO DO MAG1

A aplicação do MODHAC compreende dois momentos distintos, quais sejam a calibração, quando são determinados os parâmetros relativos a um determinado posto fluviométrico, e a geração de séries pseudo-históricas.

Operacionalmente O MODHAC é um programa executável típico do ambiente DOS, tendo como procedimento de entrada de dados a leitura de arquivos tipo ASCII, que devem obedecer a um padrão de formatação restrito definido no código fonte do programa. O resultado do processamento do MODHAC é apresentado ao fim do procedimento de cálculo também em arquivos formato ASCII.

No CD-ROM anexo à esse relatório podem ser consultados os arquivos utilizados quando da aplicação do MODHAC às estações fluviométricas da bacia do Rio Paraíba, que ilustram os formatos de entrada e saída dos arquivos do MODHAC.

A calibração exige como dados de entrada:

- série de vazões observadas;
- série de evapotranspiração na bacia;
- série de pluviometria média sobre a bacia.

O resultado da calibração é um arquivo que lista os parâmetros obtidos e o valor da função objetivo, através do qual pode ser avaliada a qualidade da calibração obtida.

O processo de calibração dos parâmetros do MODHAC dos postos fluviométricos não só da Bacia do Rio Paraíba, como do restante do estado da Paraíba, contemplando a possibilidade de adoção de parâmetros alternativos na geração das séries pseudo-históricas de vazão, foi apresentado no RP-2 do presente estudo, sendo listados a seguir os postos submetidos a tal processo:

Aparecida (37290000), no Rio Piranhas, Bacia do Rio Piranhas;

Piancó (37340000), no Rio Piancó, Bacia do Rio Piranhas;

Serra Negra do Norte (37440000), no Rio Espinharas, Bacia do Rio Piranhas;

Mumbaba (38000001), no Rio Mumbaba, Bacia do Rio Gramame;

Mamuaba (38000002), no Rio Mumbaba, Bacia do Rio Gramame;

Mulungu (38750000), no Rio Mamanguape, Bacia do Rio Mamanguape;

Ponte de Leitão (38790000) , no Rio Mamanguape, Bacia do Rio Mamanguape;

Poço de Pedras (38850000) , no Rio Taperoá, Bacia do Rio Paraíba.

O processo de geração das séries pseudo-históricas de vazão exige como dados de entrada:

- série de pluviometria média sobre a bacia.
- série de evapotranspiração na bacia;

- conjunto de parâmetros selecionados para a geração, calibrados anteriormente para as séries de fluviometria disponíveis.

Com base nos parâmetros calibrados foram geradas séries pseudo-históricas de vazão para as bacias dos vários reservatórios na Bacia do Rio Paraíba com capacidade igual ou superior a 10hm³, listados na Tabela 1.1 a seguir.

Tabela 1.1 - Síntese dos Parâmetros Médios Anuais das Séries Geradas pelo MODHAC p/ os Açudes Estudados

Açude	Corpo barrado	Município	Capacidade (1000m ³)	Área ã controlada (Km ²)	Parâmetros
Sto. Antonio	Rch. Da Serra	São Sebastião do Umbuzeiro	21424	108	Poço de Pedras (38850000)
Cordeiro	Rch. Da Serra	Congo	69966	1552	Poço de Pedras (38850000)
Poções	Rch. Mulungu	Monteiro	29870	410	Poço de Pedras (38850000)
Camalaú	Rio do Meio	Camalaú	46438	1173	Poço de Pedras (38850000)
Sumé	Rio Sucuru	Sumé	36800	763	Poço de Pedras (38850000)
Taperoá II	Rch. Campo Verde	Taperoá	15149	574	Poço de Pedras (38850000)
Serra Branca II	Rch. Serra Branca	Serra Branca	14043	54	Poço de Pedras (38850000)
Soledade	Rch. Do Padre	Soledade	27058	281	Poço de Pedras (38850000)
Epitácio Pessoa	Rio Paraíba	Boqueirão	535700	7904	Poço de Pedras (38850000)
Acauã	Rio Paraíba	São Miguel de Taipu	250000	3672	Poço de Pedras (38850000)

2 - MODELO MAG 2 (MODELO DE GERAÇÃO ESTOCÁSTICA)

A geração de séries sintéticas de vazões com base em técnicas estocásticas vem a auxiliar a definição e avaliação das políticas de operação dos reservatórios. A adoção de regras operacionais com base exclusivamente em séries históricas ou pseudo-históricas, se recente muitas vezes pelo comprimento das séries históricas de vazões afluentes aos reservatórios, que não permite avaliar, com maior detalhe, o comportamento dos reservatórios perante diferentes decisões na sua operação.

Mesmo assim, cabe destacar que a geração de séries sintéticas não permite mitigar a crônica insuficiência de informações fluviométria no Nordeste do Brasil, no entanto, sua utilização permite uma maior flexibilidade e disponibilidade de de seqüências de vazões afluentes a ser testadas.

Nesse sentido adotou-se um conjunto de metodologias já utilizadas em outros estudos no Nordeste brasileiro, sendo os modelos foram especialemnet desenvolvidos para estes estudos.

2.1 – OS MODELOS ESTOCÁTICOS

A avaliação da oferta hídrica de um determinado sistema de reservatórios sob consideração do risco devido a ocorrência de eventos mais extremos do que aqueles registrados na série histórica passa, em decorrência da pequena extensão das séries de vazão disponíveis, requer a aplicação de modelos estocásticos. A aplicação de tais modelos segue, em geral, três etapas básicas a saber:

- 1 - escolha do modelo: aqui devem ser consideradas as características hidro-climatológicas e físicas da bacia determinantes da configuração da evolução das vazões ao longo do tempo;
- 2 - determinação dos parâmetros do modelo: onde os parâmetros estatísticos do modelo são avaliados;
- 3 - validação do modelo: nesta etapa são comparados estatísticos importantes das séries geradas para o objetivo para o qual elas se destinam

A escolha de um determinado modelo estocástico é feita geralmente com base em análise da série histórica disponível, sendo bastante importante a experiência do

hidrólogo no processo de escolha. Mesmo quando essa escolha é realizada acertadamente, o modelo escolhido pode ainda apresentar fortes restrições de uso, em função dos parâmetros que devem ser estimados.

Esse efeito pode ser tal sobre as séries geradas que sua consideração torna-se ainda mais importante do que a própria escolha do modelo. Os métodos disponíveis para consideração do efeito da incerteza na estimativa dos parâmetros apresentam fortes limitações em se tratando de processos estocásticos com distribuição de probabilidades assimétricas e/ou estrutura de dependência temporal.

O processo de validação de um modelo estocástico relaciona-se diretamente com os fins de sua aplicação. Em geral a geração de séries sintéticas destina-se a estudos de regularização, nos quais realiza-se o dimensionamento de um reservatório ou é feita a determinação da oferta hídrica de uma dada bacia em termos de vazão regularizada pelos reservatórios disponíveis.

O modelo considerado no presente relatório é baseado no procedimento de superposição de duas componentes: uma que modela um processo estocástico contínuo, outra que procura reproduzir a estrutura de ocorrência de períodos secos e úmidos fazendo uso primordialmente de probabilidades de transição.

A sua adequabilidade com intervalos de discretização anual e posterior desagregação de vazões a nível mensal visa o dimensionamento e definição das regras operacionais de reservatórios localizados na região semi-árida, particularmente na bacia do rio Paraíba, e será julgada com base em alguns índices que retratam determinadas características da série histórica quando a mesma é utilizada para os fins acima propostos.

2.1.1 - INTERVALOS DE DISCRETIZAÇÃO DAS SÉRIES

O uso de modelos estocásticos no planejamento de sistemas de recursos hídricos possibilita uma extração maior da informação contida nos registros históricos de vazão. Estes em geral são bastante curtos e embora possam englobar períodos de comportamento hidrológico distinto não abrangem toda a originalidade natural do processo, no sentido de conterem todas as seqüências possíveis de ocorrências de eventos de vazão.

Particularmente no Nordeste do Brasil as séries disponíveis de vazão com mais de 25 anos e sem falhas são raras. Por outro lado dispõe-se de séries de pluviometria geralmente com mais 80 anos. Entre outras razões essa relativa abundância de dados de chuva nessa região tem levado à aplicação de modelos de transformação chuva-vazão, possibilitando assim a extensão das séries fluviométricas principalmente para fins de simulação de operação de reservatórios.

De fato a avaliação da vazão regularizada por um reservatório é basicamente determinada pela ocorrência de secas, pois estas refletem-se no mesmo na forma de esvaziamento e conseqüente falha no atendimento da demanda. Existe portanto uma concordância temporal óbvia entre a ocorrência de períodos de baixa pluviosidade e falhas de fornecimento hídrico no reservatório. O uso de um modelo chuva-vazão apropriado irá portanto preservar essa estrutura de ocorrência de secas na série de vazões transformadas, essa com uma extensão igual à da série pluviométrica disponível.

A aplicação conjunta dos modelos mensal e anual exigirão, em função da curta extensão da série histórica, o uso das vazões mensais transformadas (geradas pelo MODHAC), sendo então estas utilizadas na estimativa dos parâmetros do modelo estocástico.

2.2 – UM MODELO ESTOCÁSTICO PARA PROCESSO INTERMITENTE

O desenvolvimento de modelos estocásticos de geração de vazão para regiões de clima temperado tem sido objeto de pesquisa tratado com maior freqüência na literatura. A elaboração de propostas para a modelagem das séries de vazão em rios intermitentes tem na maioria das vezes se limitado a adaptação dos modelos desenvolvidos para zonas temperadas (Clarke, 1973, Srikanthan e McMahon, 1980, etc.).

Os modelos desenvolvidos especificamente para a modelagem de vazões em rios intermitentes procuram representar esse processo estocástico através de duas componentes:

- componente 1 : simula um processo estocástico contínuo, geralmente fazendo uso de um esquema autoregressivo de primeira ordem;

- componente 2 : simula a estrutura de ocorrência de valores nulos e não nulos. A ocorrência de vazão é representada pelo valor 1, enquanto que a não ocorrência é representada pelo 0.

A superposição das duas componentes resulta na série final. Matematicamente a combinação destas componentes pode ser escrita como:

$$Y_{i,j} = X_{i,j} Z_{i,j}$$

onde: $Y_{i,j}$ representa o processo estocástico intermitente; $X_{i,j}$ variável binária (0,1); $Z_{i,j}$ variável estocástica contínua e positiva; i e j são índices de tempo (ano, mês ou dia).

2.2.1 - MODELO ESTOCÁSTICO ANUAL

O modelo de geração anual utiliza o mesmo princípio de superposição de duas componentes para simular a estrutura de ocorrência de secas na série anual. A primeira componente é representada neste contexto por uma variável binária modelada por uma Cadeia de Markov de dois estados, com os quais classifica-se um ano como seco ou úmido.

Assim como no modelo diário a matriz de probabilidades de transição será uma função direta do valor limite adotado para classificação de um ano como seco ou úmido. Porém a definição deste limite para uma série histórica de vazões anuais constitui uma grande dificuldade, pois essa fixação implica no estabelecimento de uma conceituação para secas. Segundo Yevjevich (1967) uma seca é uma série de valores medidos inferiores a um valor limite adotado.

A seqüência deve ser no mínimo precedida e sucedida por pelo menos um valor superior ao valor limite adotado. As implicações da definição deste limite na análise de secas é analisada por Dracup (1980) e Chang (1990).

Na realidade o valor limite para classificação das vazões anuais constitui uma variável dependente de parâmetros hidro-climatológicos, físicos, agrônômicos e sociais, visto ser possível uma definição de seca sob esses diversos pontos de vista da pesquisa. A adoção do valor limite como uma variável irá produzir diferentes matrizes de transição das quais dependerão a severidade das seqüências de secas a serem geradas pelo modelo. A estimativa da matriz de transição pode ser realizada

diretamente sobre a série histórica através da avaliação das seguintes probabilidades condicionais:

$$\begin{array}{cc}
 & \text{Seco}(T) & \text{Umido}(N) \\
 \text{Seco}(T) & W(GJ = T | ZJ = T) & W(GJ = T | ZJ = N) \\
 \text{Umido}(N) & W(GJ = N | ZJ = T) & W(GJ = N | ZJ = N)
 \end{array}$$

onde: GJ= ano atual; ZJ= ano anterior.

O valor limite que define a matriz acima é obtido como um percentual variável da vazão média anual. Esse percentual é tomado como uniformemente distribuído no intervalo [0,1]. Quando esse percentual atinge a unidade, o valor limite será igual a vazão média anual, o que corresponde ao critério de Yevjevich (1963) para análise de secas.

O procedimento de geração da variável binária segundo a matriz de transição dada é realizado por estimativa direta sobre a série histórica.

A segunda componente do modelo é simulada através de um esquema autoregressivo de ordem 1 com distribuição de probabilidade Gama de três parâmetros. O conjunto de números aleatórios Gama é gerado conforme proposto por Obeysekera e Yevjevich (1985).

Após a geração das seqüências correspondentes as duas componentes com a extensão desejada para a série sintética final, ambas são combinadas por multiplicação de acordo com a equação apresentada acima.

2.3 - CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO

A validação de um modelo estocástico consiste em uma verificação da coerência entre algumas características das séries geradas com as da série histórica. As características a serem verificadas estão relacionadas com a razão pela qual se pretende utilizar as séries geradas.

Os critérios de validação baseiam-se na determinação do volume necessário ao reservatório e algumas estatísticas realizadas no modelo de simulação de operação. No primeiro critério é utilizado o algoritmo de seqüência de pico definido por Loucks et al. (1981):

$$BR = \max_{i,j} \{K_{i,j}\}$$

com

$$K_{i,j} = \max\{0, K_{i,j-1} + Q_{ab} - Y_{i,j}\}$$

onde: BR: capacidade necessária ao reservatório; Q_{ab} : vazão retirada mensalmente; i,j : respectivamente índice de ano e mês.

O algoritmo acima é executado para a série histórica e cada uma das séries sintéticas, tomando-se $K_{1,1}=0$ e $K_{i,1}=K_{i-1,12}$. Os valores obtidos podem transformar-se em adimensionais dividindo pela vazão média.

O segundo critério de avaliação baseia-se na operação simulada do reservatório considerando suas características físicas de projeto: volumes máximo e mínimo, curva cota - área - volume, etc. A simulação de operação para um determinado ano i utiliza a seguinte regra de operação:

$$Q_{ab} = \begin{cases} Q \Leftrightarrow V_{j+1} \geq V_{\min} \\ 0 \Leftrightarrow \left[V_j + Y_j - E_j \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \right] < V_{\min} \\ Q_v = \left[V_j + Y_j - E_j \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \right] - V_{\min} \Leftrightarrow V_{j+1} < V_{\min} \end{cases}$$

$$V_{i+1} \leq V_{\max}$$

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

$$j = 1, 2, 3, \dots, 12$$

onde: V , volume de água armazenada (m^3); Q_v , vazão de falha (m^3/s); Q , vazão regularizada (m^3/s); V_{\max} , volume máximo do reservatório (m^3); V_{\min} , volume mínimo do reservatório (m^3); E , Evaporação mensal (mm); A_1 e A_2 , áreas do espelho d'água do reservatório no início e fim de mês (m^2).

Após a realização do balanço hídrico no reservatório para os n anos disponíveis são computados as seguintes estatísticas para uma determinada vazão retirada:

- número de falhas;
- intervalo médio entre falhas;
- número de anos com pelo menos uma falha;
- garantia de atendimento computada como a razão entre o número de meses com falha e o número total de meses da simulação.

Sendo o processo de simulação totalmente determinístico, os índices acima irão apresentar uma mesma tendência, ou seja, caso o modelo verificado gere séries que tendam a superestimar da oferta hídrica do reservatório todos eles evidenciaram essa tendência implicando em redundância, não sendo portanto necessário o uso de todos eles.

A primeira indicação da tendência de superestimação ou subestimação é fornecida pelo volume útil do reservatório dado pelo algoritmo de seqüência de pico, caso estes volume sejam para um dado modelo sempre superiores ao valor obtido com a série histórica os demais índices indicaram uma tendência de subestimação da oferta

hídrica da bacia refletindo-se como um elevado número de falhas, um pequeno intervalo médio entre falhas e uma reduzida garantia de atendimento.

2.4 - GERAÇÃO ESTOCÁSTICA MULTIVARIADA DE VAZÕES

Considerando a simulação integrada dos reservatórios faz-se necessário que a geração de vazões seja conduzida da perspectiva multivariada. Para isto deve-se garantir que os parâmetros estatísticos cruzados sejam preservados, principalmente a correlação entre as vazões nos diversos pontos da bacia hidrográfica.

Tendo em vista a forte não - linearidade da relação entre os diversos reservatórios integrantes das bacias consideradas lançou-se mão das Redes de Neurônios Artificiais (RNA) para a reprodução desta característica do sistema. A seguir são resumidos alguns dos pontos mais relevantes da metodologia empregada.

2.4.1 - BASES CONCEITUAIS

As redes de neurônios artificiais (RNA) foram desenvolvidas em analogia com as redes de neurônios biológicas. Os estudos que levaram a sua criação começaram a pouco mais de 50 anos, sendo o trabalho de McCulloch e Pitts (1943) apontado como contribuição pioneira para este ramo de pesquisa, cujo desenvolvimento foi inicialmente motivado pelo desejo de tentar entender e emular sob uma abordagem matemática algumas características do cérebro humano.

Desde a sua criação muitas aplicações tem sido apresentadas, principalmente na área de previsão de índices financeiros. No atual estágio de desenvolvimento a teoria das RNA's apresenta três grandes ramos associados com os modelos da Teoria Geral dos Sistemas que tratam da não linearidade, são eles: Redes Cibernéticas (Rosenblatt, 1957), Memória Associativa (Hopfield, 1982) e modelos biológicas (Carpenter e Grossberger, 1986).

As redes cibernéticas ou perceptrons constituem o ramo mais antigo e desenvolvido em relação aos demais. Seu conceito de desenvolvimento está analogicamente associado com a propriedade do sistema nervoso central de aprender reações face a estímulos externos em um ambiente hostil. Conforme ressaltado por Müller e Reinhard (1992), o aprendizado de tais reações e comportamentos foi

provavelmente determinante para o desenvolvimento do cérebro humano durante a evolução.

A aplicação deste tipo de RNA como ferramenta matemática capaz de representar as relações dinâmicas não lineares entre as vazões afluentes aos diversos reservatórios integrantes da infra-estrutura hídrica da bacia foi investigada em seus aspectos limitantes mais relevantes: preservação da estrutura de correlação espacial entre as séries.

2.4.2 - COMPONENTES TOPOLÓGICOS DE UMA RNA

Tendo sido o princípio de funcionamento das redes de neurônios biológicas o modelo de construção das RNA's, ambas constituem sistemas de processamento de informações que possuem várias características em comum. Alguns componentes básicos de um neurônio biológico relacionados com o fluxo de informações são relevantes para o entendimento do funcionamento das RNA's: os dendritos, que recebem os impulsos elétricos transmitidos pelos outros neurônios; a sinapse, que através de processos químicos transmite esses impulsos; o corpo da célula, que recolhe os sinais recebidos e em função da sua magnitude retransmite-o para as outras células através do Axon.

Conforme ressaltado por FAUSETT (1993), o desenvolvimento das RNA's como versões generalizadas de modelos matemáticos de representação das propriedades de aprendizado do cérebro humano baseiam-se em prerrogativas fundamentais análogas: a) a informação é processada em um elemento singular (o neurônio) que transforma o sinal recebido em sinal a ser transmitido, a equivalente propriedade biológica é emulada aqui por um parâmetro que conjugado com uma função de ativação (geralmente não linear) estabelece o limite a partir do qual o sinal é retransmitido; b) essa informação ou sinal é transmitida entre neurônios através de ligações entre estes; c) cada ligação possui um fator de ponderação ou peso associado, que nas equações aparece geralmente como coeficiente de multiplicação do sinal transmitido.

As RNA's são basicamente caracterizadas pela sua arquitetura e função de ativação usada no processamento do sinal. A arquitetura das RNA's é determinada pela disposição dos neurônios e suas interligações. No caso dos perceptrons a disposição destes é feita em camadas, que no mínimo são em número de 2: uma que

recebe o estímulo externo (input) formada pelos chamados neurônios sensores (retina) e uma outra (output) que transforma o sinal causando a reação desejada. O fluxo de informação aqui é unidirecional podendo ainda a rede apresentar 1 ou mais camadas intermediárias de neurônios chamadas camadas escondidas que assim como a camada- output compõe-se de neurônios-motores que processam e retransmitem o sinal.

As funções de ativação podem ser de diversos tipos. Muitas aplicações utilizam a função sigmoideal cuja faixa de variação de valores assumidos está restrita ao intervalo (0,1). Em geral a adoção de uma determinada função de ativação depende do problema a ser modelado.

2.4.3 - O PROCESSO DE APRENDIZADO

Considerando uma rede de perceptron com uma camada de neurônios intermediária, a equação representativa da transformação efetuada sobre o vetor-input $X (x_1, x_2, \dots, x_n)$ no espaço R_n que leva ao vetor $Y (y_1, y_2, \dots, y_n)$ no espaço R_m é dada por:

$$Y = F(X)$$

Na modelagem dos problemas reais o que se dispõe em termos de dados de entrada são o vetor X , cujo número de componentes determina a complexidade do problema (expresso como número de graus de liberdade) e um determinado vetor D , que representa uma série de valores medidos e são o resultado das transformações não lineares que o sistema tratado realiza sobre X . Os parâmetros devem ser determinados de tal forma que o vetor Y (componentes calculadas) seja o mais próximo possível do vetor D (componentes medidas), ou seja tal que o erro entre Y e D seja mínimo, trata-se portanto de um problema de otimização no hiper-espaço. Considerando como hipótese um único par de vetores (X, D) como disponíveis para a chamada fase de treinamento da rede o erro e como função do conjunto de parâmetros W a ser otimizado é dado por:

$$e(W) = \frac{1}{2} \|D - Y(W)\|^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m [d_k - y_k(W)]^2$$

A equação acima representa a função objetivo para a qual deseja-se determinar o ponto de mínimo. O método mais comum utilizado para essa finalidade é o chamado algoritmo de propagação regressiva dos erros (backward propagation), que corrige iterativamente W com base no erro entre os valores calculado e esperado. Trata-se de um algoritmo do tipo gradiente descendente para o qual o processo de busca do ponto de mínimo parte de um ponto aleatoriamente escolhido e usa para as iterações seguintes o gradiente da função objetivo para identificar a sua direção de maior decrescimento, assim a matriz W para o próximo ciclo no processo de treinamento é dada por:

$$[W]_{i+1} = [W]_i + h(-grad_w e(W))$$

onde h é um parâmetro que determina o passo de avanço na direção de decrescimento da função objetivo. No treinamento da rede é evidente que quanto maior o número de parâmetros (X,D) utilizados mais eficiente pode se tornar a modelagem.

2.4.4 – ARQUITETURA DAS REDES: DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DAS VAZÕES

A arquitetura adequada de uma RNA para a modelagem de determinado sistema é aquela que com o menor número de neurônios possível é capaz de reproduzir a relação entre as variáveis envolvidas, com um erro dentro do limite aceitável. A definição do número de neurônios para a camada-input e output depende do tipo de problema tratado. No caso de fenômenos com muitos graus de liberdade uma análise fatorial de componentes principais pode levar a definição da dimensão do espaço R , cujos eixos correspondem as variáveis que explicam a maior parte da variância do sistema. Na modelagem de sistemas que apresentam uma dinâmica caótica, o número de neurônios nas camadas de input e output correspondem geralmente a dimensão do espaço de fase.

Com relação as camadas intermediárias o procedimento recomendável consiste em experiências com diferentes números de neurônios e observação do comportamento dos erros. Principalmente na modelagem de séries de tempo deve ser observada a regra da necessidade de que a rede tenha o menor número possível de neurônios na camada intermediária, pois o número de parâmetros cresce numa proporção maior e a rede pode apresentar tendência a reproduzir em parte as forças estocásticas.

No caso da desagregação espacial de vazões o procedimento de determinação da arquitetura consistiu basicamente das seguintes fases:

- 1 – Rede única com arquitetura constituída de 01 neurônio de entrada e m neurônios de saída, onde m corresponde ao número de reservatórios a montante do reservatório representado pela neurônio singular da camada de entrada;
- 2 - Número m de redes com apenas 01 neurônio de entrada e 01 neurônio de saída;

O treinamento das redes em ambos os casos foi procedido com a série pseudo-histórica disponível excluindo-se destas os últimos 09 anos, os quais foram utilizados na validação das redes, ou seja, o cálculo das vazões para um período não utilizado na fase de treinamento. A comparação dos resultados da validação de ambos os casos levou a definição de uma ou outra formulações de modelagem. Em todos os casos analisados a Segunda alternativa apresentou-se como mais vantajosa tendo sido adotada como procedimento definitivo.

Embora seja óbvio, convém entretanto ressaltar que a desagregação espacial das vazões entre os reservatórios de maior porte apresenta sempre melhores resultados pois os mesmos tendem a ser homogêneos entre si, principalmente pelo fato de suas áreas contribuintes, em sua elevada extensão, serem determinantes uma da outra, de montante para jusante.

2.5 – GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DAS VAZÕES PARA OS PONTOS DE INTERESSE NA BACIA

Os locais selecionados para geração de séries sintéticas apresentam diferentes extensões de séries históricas, as quais foram utilizadas nos procedimentos de verificação e validação do modelo. A seguir são apresentadas as séries geradas, para ambos os procedimentos foram de mesma extensão que a correspondente série histórica e em número de 50, sobre as quais estimou-se os parâmetros a nível mensal e anual.

2.5.1 – VERIFICAÇÃO DO MODELO

O modelo apresentado foi verificado para cada um dos reservatórios considerados. A verificação foi baseada nos seguintes parâmetros estatísticos:

- média;
- desvio padrão;
- CV;
- Coeficiente de assimetria;
- Coeficiente de correlação;
- Coeficiente de autocorrelação.

A comparação entre os parâmetros estatísticos obtidos a partir da série histórica e a média dos parâmetros das séries sintéticas são apresentadas graficamente em anexo. Conforme se observa nos gráficos mencionados em todos os casos o modelo reproduz de forma adequada os parâmetros estatísticos pretendidos.

2.5.2 – VALIDAÇÃO DO MODELO

O parâmetros adicionais mencionados quando da descrição metodológica foram aqui empregados para a validação do modelo, atestando desta forma a adequabilidade para os fins propostos.

Estes resultados apresentam também uma certa coerência em relação a algumas observações de ordem prática. A principal delas relaciona-se com a estimativa do período de retorno dos eventos históricos extremos relacionados com o dimensionamento e operação simulada de reservatórios. Em ambos os reservatórios os índices estatísticos analisados contêm o valor obtido com a série histórica, geralmente entre os quantis acima de 75% e abaixo de 25%. Porém a natureza empírica do modelo não permite sua aplicação na estimativa precisa de períodos de retorno de eventos extremos, sendo aconselhável seus resultados apenas como indicadores.

2.5.3 – DESAGREGAÇÃO ESPACIAL

A desagregação espacial das vazões estocásticas geradas para cada um dos reservatórios foi procedida por aplicação direta da respectiva RNA treinada e validada conforme já descrito. Os reservatórios utilizados como base (neurônio singular na camada de entrada) foi o de Eptácio Pessoa

O procedimento foi aplicado a uma série sintética de 300 anos gerada para o reservatório base, dando origem assim a séries estocásticas correspondentes em cada um dos reservatórios de montante.

3 - MODELO MAG 3 (MODELOS DE EVENTOS EXTREMOS)

O modelo MAG-3, direcionado ao tratamento de eventos extremos, compõem-se de duas partes distintas, cada uma delas com um enfoque diferenciado, sendo a primeira destinada ao tratamento de eventos extremos de pluviometria, enquanto a segunda centra-se no estudo de eventos de seca.

Essa distinção de enfoque leva mesmo a adoção de duas metodologias e, conseqüentemente, dois programas independentes para o tratamento dessas questões.

Os eventos de pluviometria extrema são tratados no programa denominado PLUEXT (Modelo de Pluviometria Extrema), que teve sua concepção baseada em programas como o EXVAL90, porém foi reprogramado recebendo uma interface mais amigável.

Os eventos de seca, por sua vez, são tratados com a utilização do MUSAG (Modelo de Umidade do Solo para Fins Agrícolas), com a preocupação de oferecer respostas que orientem o manejo agrícola.

3.1 - DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

3.1.1 – MODELO DE PLUVIOMETRIA EXTREMA (PLUEXT)

A análise de eventos extremos de pluviometria é realizada com base no conceito de período de retorno. Admite-se um evento com TR anos de período de retorno aquele com probabilidade $(1-1/TR)$ de ocorrência.

O processo é feito ajustando às série de máximos anuais distribuições de probabilidades já classicamente empregadas nessa modalidade de estudo hidrológico, em seguida aplicam-se testes de ajustes de probabilidade aos ajustes, permitindo selecionar a melhor representação da série de máximos.

Ao final são calculados os valores correspondentes a cada uma das distribuições de probabilidade ajustadas em função dos períodos de retorno para os quais se necessita dos valores extremos.

3.1.1.1 – Distribuições de probabilidade ajustadas

A natureza das séries de máximos de pluviometria na Região Nordeste, que apresentam um histograma tipicamente unimodal e limitado à esquerda, conduz a limitação das distribuições de probabilidades susceptíveis de representar esse processo.

Dessa forma realiza-se o ajuste dos parâmetros das seguintes distribuições:

Normal 2 parâmetros;

Lognormal 2 parâmetros

Lognormal 3 parâmetros

Gamma 2 parâmetros

Gamma 3 parâmetros

LogGamma 2 parâmetros

LogGama 3 parâmetros

A estimativa dos parâmetros para todas essas distribuições foi realizada pelo método dos momentos, sendo a formulação completa de cada uma delas, bem como do cálculo dos parâmetros, apresentada em KITE(1988).

3.1.1.2 – Testes de ajuste de distribuições de probabilidade

A avaliação da qualidade do ajuste das distribuições de probabilidade utilizadas dispõe de duas ferramentas, ou testes de ajuste (HANN (1977)):

Teste Kolmogorov-Smirnov; e

Teste Chi-quadrado.

No primeiro desses testes compara-se o máximo desvio observado entre a probabilidade calculada e a frequência observada na série com valores críticos tabelados, que são função do número de elementos da amostra e do nível de significância pretendido.

No teste do Chi-quadrado é feita a comparação entre o número de valores observados em cada intervalo de classe e a contagem segundo a distribuição de probabilidades testada.

O teste estatístico é calculado a partir de

$$c_c^2 = \sum_{i=1}^k (O_i - E_i)^2 / E_i$$

Onde k é o número de intervalos de classe, O_i é o número de observações e O_e a contagem esperada da classe i. A distribuição do valor do teste é do tipo chi-quadrado com k-p-1 graus de liberdade, onde p é o número de parâmetros da distribuição que está sendo testada.

Assim, verifica-se se para um determinado grau de significância o valor tabelado do Chi-quadrado em relação ao valor calculado do teste, caso o último seja menor não se rejeita a hipótese de que a distribuição escolhida possa representar os dados observados.

A análise dos valores obtidos nos testes do Kolmogorov-Smirnov e Chi-quadrado orienta a adoção de uma das distribuições testadas, para representar a precipitação intensa no posto analisado.

3.1.2 – MODELO DE UMIDADE DO SOLO PARA FINS AGRÍCOLAS (MUSAG)

Os déficits hídricos a nível de parcela do solo são indicadores do que se denomina no Nordeste de seca agrícola. Trata-se de um padrão pluviométrico que, devido sua variabilidade espacial e temporal, reduz consideravelmente a produtividade das culturas de sequeiro ou, nos casos extremos, as inviabiliza.

Uma metodologia para a avaliação da frequência e severidade com que ocorre este tipo de seca pode ser desenvolvida com base na aplicação de um modelo de umidade do solo do tipo do MUSAG6 (modelo e umidade do solo para fins agrícolas).

O modelo de umidade do solo proposto utiliza as seguintes equações com intervalo de tempo diário:

$$US_f = US_i + VI - VP - VEV_T$$

$$VESC = Pr - VI$$

onde US_f (mm.) e US_i (mm.) são as umidades do solo inicial e final do período em estudo, respectivamente; VI (mm.) é o volume infiltrado; VP (mm.) é o volume percolado; $VEVT$ (mm.) é o volume evapotranspirado; $VESC$ (mm.) é o volume escoado e Pr (mm.) é a precipitação ocorrida.

Estas variáveis são avaliadas com base nas seguintes funções:

- Função de infiltração (I). - Considera-se que a capacidade de infiltração do solo é uma função das características pedológicas do solo e da quantidade de umidade disponível no mesmo num dado instante, assim:

$$I = I_0 \quad \text{para } US = 0.$$

$$I = PP + (I_0 - PP) \left[\frac{(CC - US)}{CC} \right]^\alpha \quad \text{para } 0 < US < CC$$

$$I = PP \quad \text{para } US \geq CC$$

onde I_0 (mm/dia) é a capacidade de infiltração máxima, função das características do solo; CC (mm) é a capacidade máxima de retenção de água não gravitacional, na parcela de solo contida no primeiro metro de profundidade; PP (mm/dia) é a capacidade máxima de percolação profunda, função das características do solo e do subsolo subjacente e (α) é um parâmetro de ajuste da variabilidade da infiltração com a umidade do solo.

- Função de percolação (P) - Considera-se que a capacidade de percolação profunda do solo é uma função das características pedológicas do solo, do subsolo subjacente e da quantidade de umidade disponível no mesmo num dado instante; assim:

$$P = 0 \quad US = 0.$$

$$P = PP \left[\frac{US}{CC} \right]^\beta \quad 0 < US < CC$$

$$P = PP \quad US \geq CC$$

onde (β) é um parâmetro de ajuste da variabilidade da percolação com a umidade do solo.

- Função de evapotranspiração (EVT) - Considerou-se que a capacidade de evapotranspiração é uma função das condições climáticas, representadas pela evapotranspiração potencial, das características pedológicas do solo e da quantidade de umidade disponível no mesmo num dado instante; assim:

$$\text{EVT} = 0 \quad \text{para } \text{US} = 0.$$

$$\text{EVT} = \text{EVP} [\text{US}/(\text{kCC})]^\gamma \quad \text{para } 0 < \text{US} < \text{kCC}$$

$$\text{EVT} = \text{EVP} \quad \text{para } \text{US} \geq \text{CC}$$

onde EVP é a evapotranspiração potencial (mm./dia), avaliada com base em dados de evaporação de tanques "classe A" ; k é um coeficiente com valores: $0 < k < 1$ e um parâmetro de ajuste.

O algoritmo do modelo segue uma metodologia semelhante à utilizada no modelo IPH-II5 (Tucci (1979)). São identificados diferentes casos de resolução da equação de balanço de umidade do solo, dependendo do estado da função de infiltração e da relação desta com a precipitação ocorrida naquele período (Pr). Estes casos são:

- Caso 1: $l_i > \text{Pr}$ e $l_f > \text{Pr}$. Onde l_i e l_f são as capacidades de infiltração no início e fim do intervalo de tempo em estudo. Neste caso, toda a precipitação infiltra. Não ocorre escoamento e não é necessário realizar iterações.
- Caso 2: $l_i > \text{Pr}$ e $l_f < \text{Pr}$. Neste caso, ocorre escoamento, e o cálculo é realizado mediante iterações.
- Caso 3: $l_i > \text{Pr}$ e $l_f < \text{Pr}$, sendo que durante o período ocorrem valores de $\text{US} > \text{CC}$. Neste caso ocorre escoamento e o cálculo é realizado mediante iterações, surgindo uma nova dificuldade, decorrente da mudança de função de infiltração devido a saturação do solo durante o período.

- Caso 4: $li < Pr$ e $lf < Pr$. Neste caso há escoamento, mas não é necessário realizar iterações.
- Caso 5: $li < Pr$ e $lf < Pr$, sendo que durante o período ocorrem valores de $US > CC$. Neste caso ocorre escoamento e o cálculo não requer iterações, surgindo a mesma dificuldade do caso 3, decorrente da mudança de função de infiltração devido à saturação do solo durante o período.

Com base neste modelo é possível obter séries de umidade do solo disponíveis para cada dia do ano em cada local onde se dispunha de séries de precipitação diária e indicadores que permitam avaliar os parâmetros do modelo como mapas de solos e mapas geológicos e geomorfológicos.

3.2 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAG3

3.2.1 - MODELO DE PLUVIOMETRIA EXTREMA (PLUEXT)

A implementação do Modelo de Pluviometria Extrema (PLUEXT) é realizada por um software com uma interface amigável, oferecendo a possibilidade de selecionar o posto pluviométrico cuja série deve ser analisada mediante rotinas de mouse, como um clique duplo.

A série de pluviometria diária do posto selecionado é tomada como dado de entrada do modelo, sendo realizada a seleção dos máximos anuais dessa série.

O processamento do modelo consiste num resumo estatístico mensal e anual dos dados da série pluviométrica diária, além do resumo dos máximos diários anuais. A seguir são realizados os testes do Kolmogorov-Smirnov e do Chi-quadrado para os ajustes das distribuições de probabilidade à série de máximos anuais, e então são calculados os valores correspondentes aos vários tempos de retorno analisados (2 anos; 2,33 anos; 5 anos; 10 anos; 25 anos; 50 anos; 100 anos; 200 anos; 500 anos; 1.000 anos; e 10.000 anos).

Os resultados podem ser visualizados em tabelas e gráficos no próprio programa PLUEXT, ou consultados em um arquivo tipo ASCII gerado na execução do programa.

A implementação apresentada no CD-ROM anexo disponibiliza a análise de 131 postos pluviométricos que cobrem todo o estado da Paraíba.

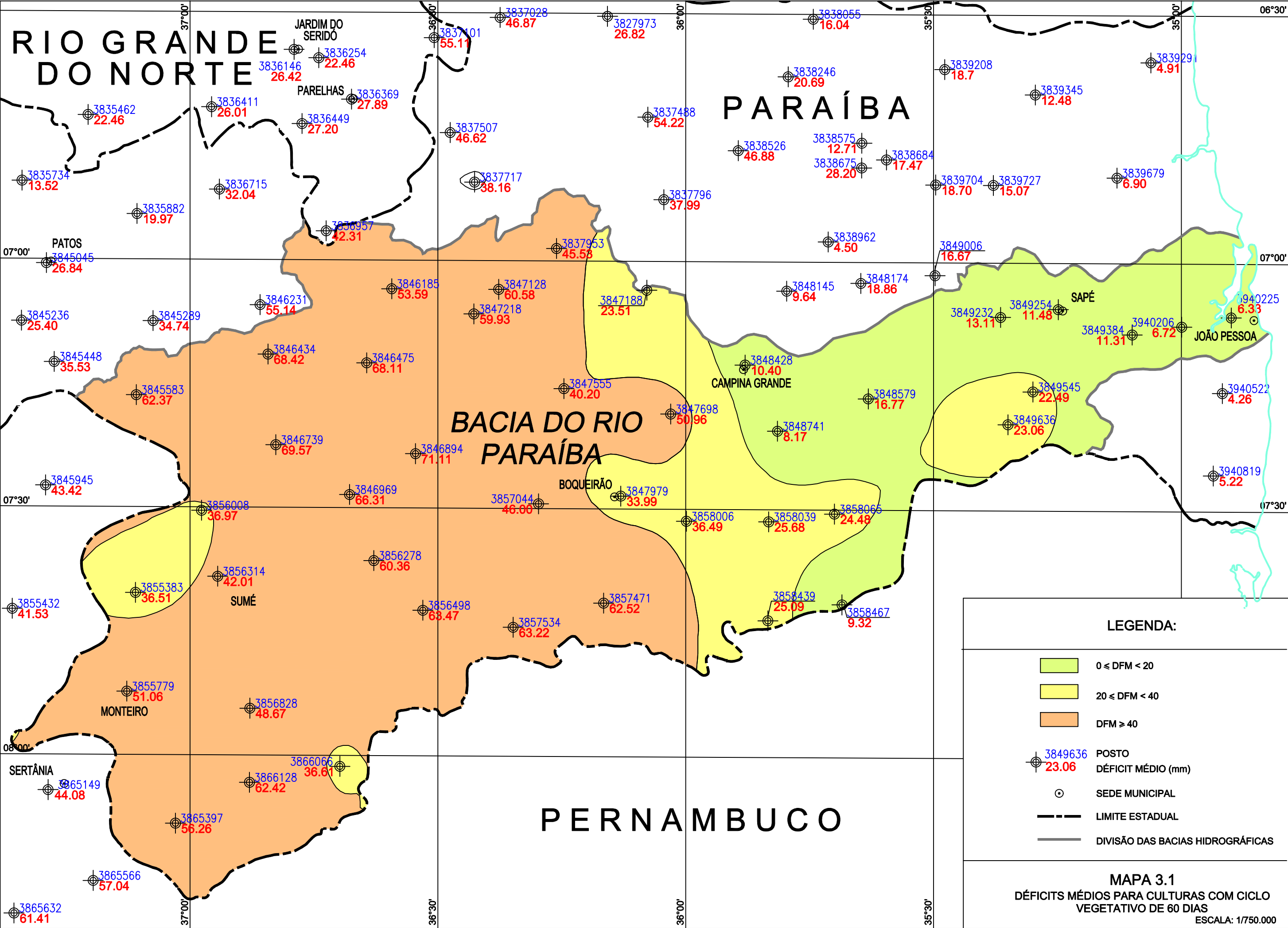
3.2.2 – MODELO DE UMIDADE DO SOLO PARA FINS AGRÍCOLAS (MUSAG)

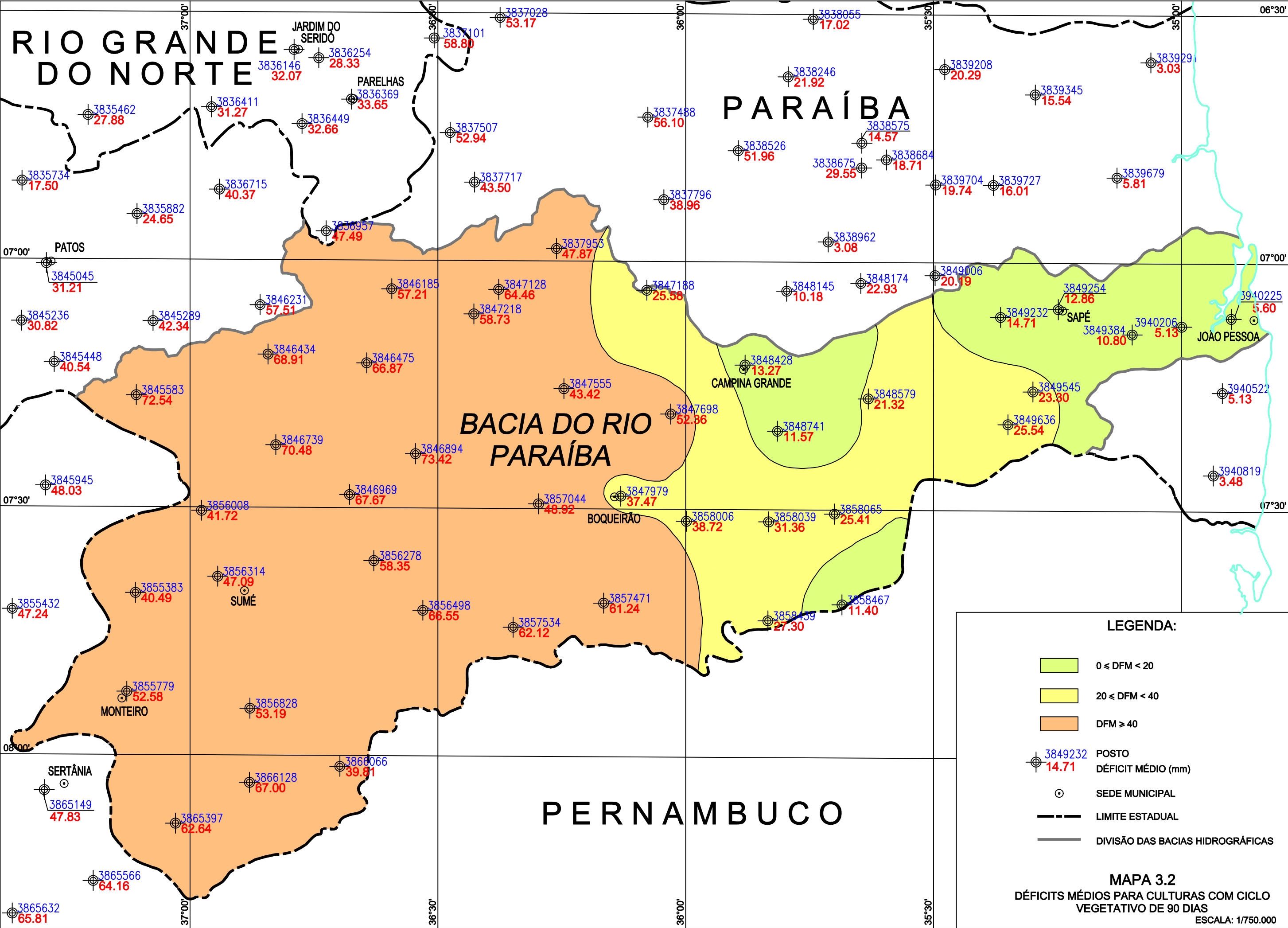
A implementação do MUSAG foi realizada com sua aplicação aos 131 postos pluviométricos com dados disponíveis do estado da Paraíba, incluindo-se a apresentação dos resultados no CD-ROM anexo.

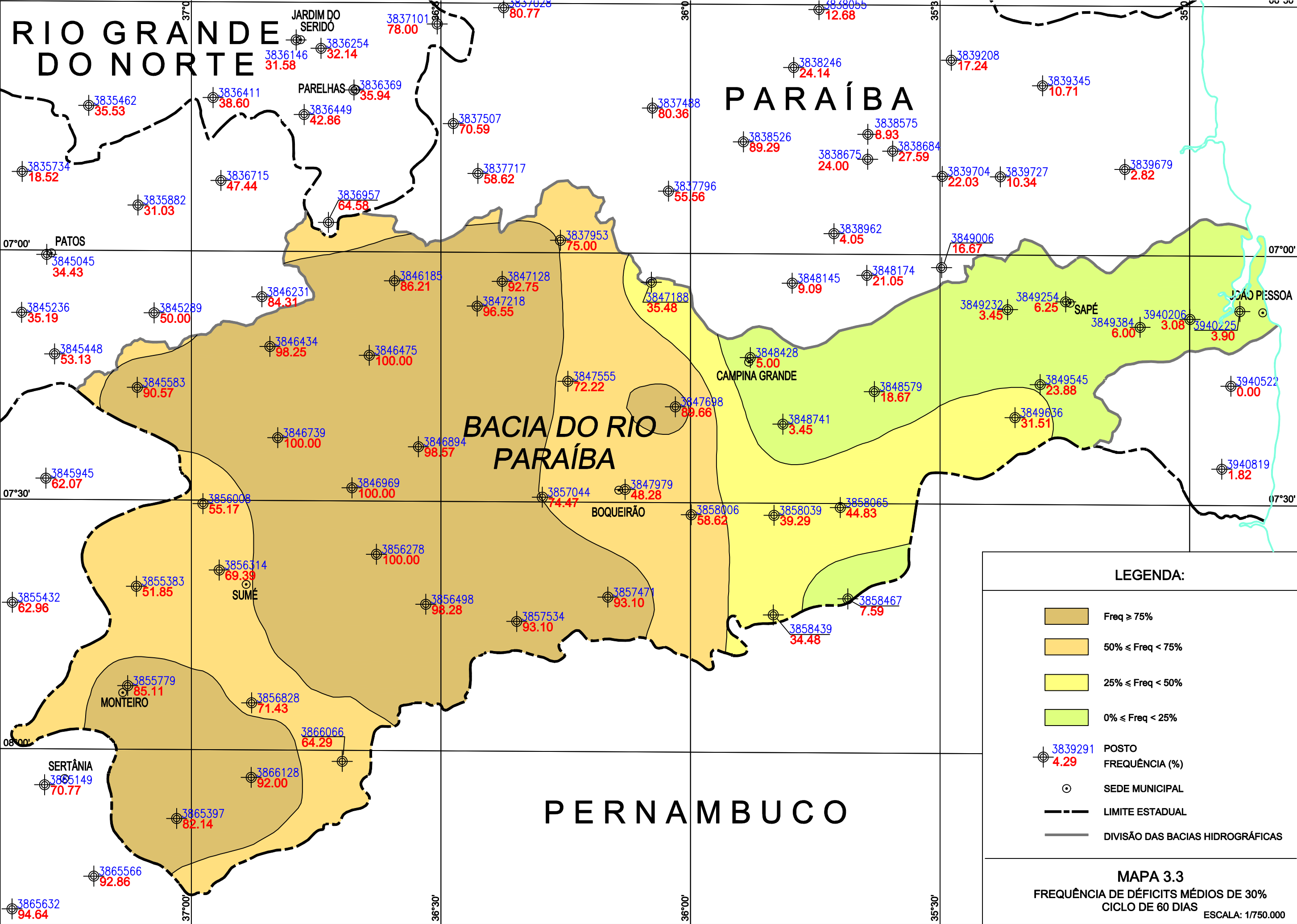
Os resultados da aplicação do modelo Musag são apresentados sob duas diferentes formas. Numa primeira abordagem foram mapeados os déficits hídricos médios a nível de parcela do solo para dois tipos de culturas (ciclo de 60 e 90 dias), obtidos com base nas séries históricas de precipitações diárias disponíveis para cada posto pluviométrico.

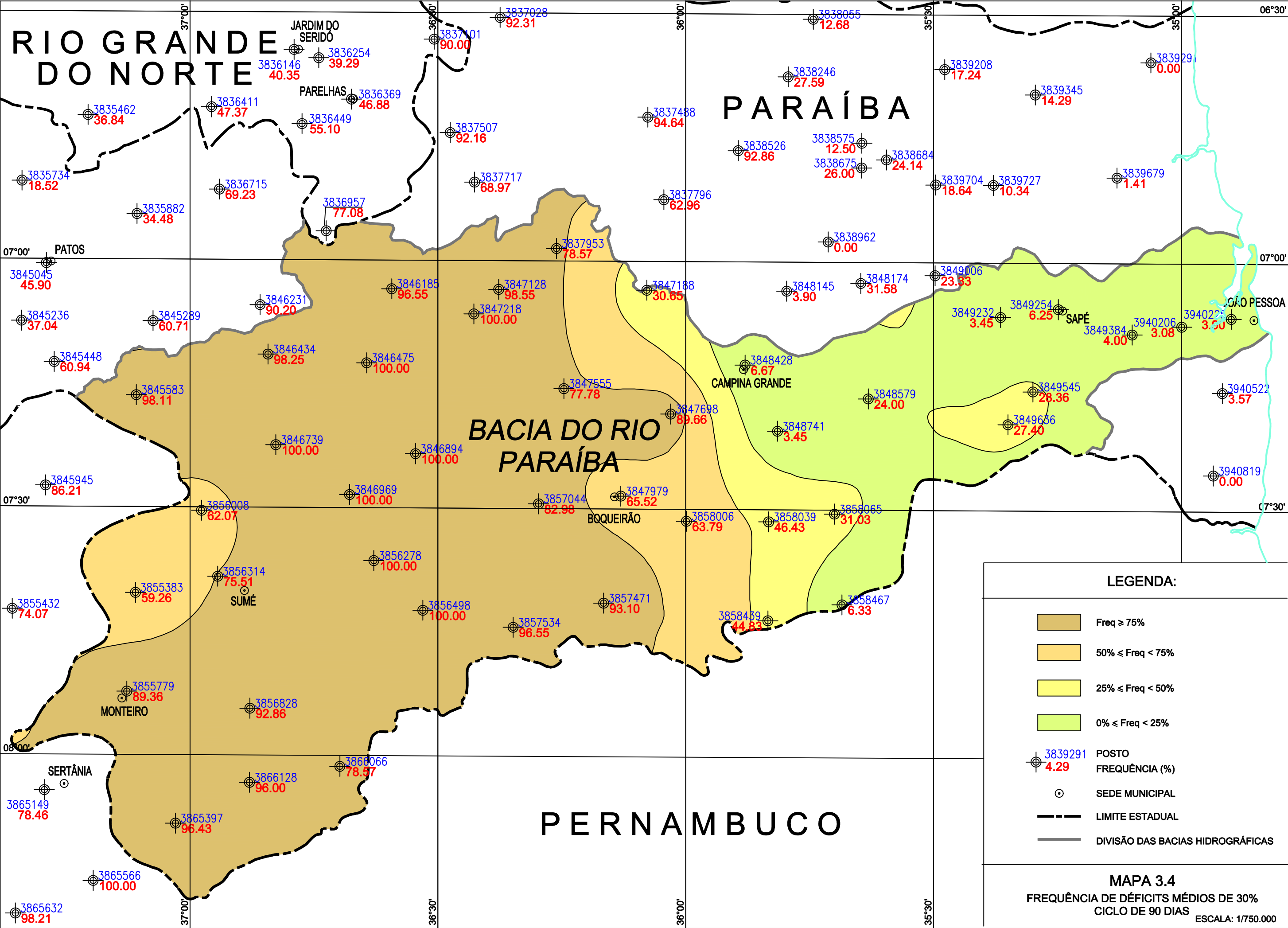
Uma análise destes resultados, apresentados nos Mapas 3.1 a 3.2, mostra a ocorrência de déficits hídricos susceptíveis de prejudicar e, às vezes, inviabilizar as culturas de sequeiro em amplas áreas da bacia do rio Paraíba. Destacam-se como as áreas mais desfavoráveis para a agricultura de sequeiro a região da serra da Borborema, onde torna-se quase impossível a exploração de plantios em regime de sequeiro, mesmo para ciclos culturais curtos (60 dias) como o do feijão.

Outra abordagem para apresentação dos resultados obtidos da aplicação do modelo MUSAG consiste em avaliar a frequência com que ocorrem déficits hídricos capazes de dizimar as culturas e fazer fracassar o plantio. Os Mapas 3.3 e 3.4 apresentam mapeamentos da frequência com que ocorrem déficits hídricos superiores a 30 % das demandas necessárias para o desenvolvimento de culturas com ciclo de 60 e 90 dias, respectivamente.









4 - MODELO MAG 4 (MODELO DE BALANÇO HÍDRICO)

A operação da rede de reservatórios da bacia do rio Paraíba adquire grande importância devido a dos aspectos: o primeiro diz respeito à importância dos reservatórios para o abastecimento dos principais centros de demandas existentes na bacia; por outro lado o fato de existir um projeto de transposição que prevê o lançamento de águas provenientes do rio São Francisco na bacia do rio Paraíba, faz com que estes reservatórios adquiram uma importância estratégica, enquanto compensadores deste sistema e possíveis elementos geradores de sinergia hídrica.

Para avaliar estes aspectos se procedeu a aplicar ao sistema de reservatórios da bacia modelos híbridos de simulação, sob esta denominação engloba-se os modelos que têm como principal característica reproduzir a operação dos reservatórios sob a premissa de que o operador desconhece o futuro e não utiliza nenhum tipo de ferramenta de previsão de vazões afluentes aos mesmos. Isto é, os valores das variáveis de resposta (principalmente a vazão regularizada) e das diferentes variáveis de decisão são obtidos em condições semelhantes as que atualmente se encontram os operadores dos reservatórios.

A diferença entre os modelos ditos de simulação e os denominados híbridos reside no fato de que, nestes últimos, recorre-se a técnicas heurísticas ou de otimização que permitem a busca de ótimos das variáveis de decisão, mediante a execução de um elevado número de simulações ou a solução de algoritmos de programação linear em cada intervalo de tempo simulado. A seguir são comentados os principais aspectos destes modelos.

4.1 - AVALIAÇÃO DA OFERTA D'ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO

A metodologia usual para a avaliação da disponibilidade hídrica de um dado reservatório tem como ponto central a chamada equação do balanço hídrico, a qual contabiliza todas as afluições ou aportes aos reservatórios bem como todas as retiradas ou eventuais sangrias. Essa equação tem, em geral, a seguinte formulação:

$$V_{r_i} = V_{r_{i-1}} + V_{a_i} + V_{p_i} - V_{e_i} - V_{s_i} - Q_{ab_i}$$

Onde, $V_{r,i}$: volume armazenado no mês i ; $V_{r,i-1}$: volume armazenado no mês $i-1$;
 $V_{a,i}$: vazão afluyente ao reservatório no mês i ; $V_{p,i}$: precipitação direta sobre o espelho d'água no mês i ; $V_{e,i}$: volume evaporado no reservatório no mês i ; $V_{s,i}$: volume sangrado no mês i ; $Q_{ab,i}$: volume regularizado ou retirado no mês i .

O procedimento de simulação da operação de um reservatório consiste, portanto, na solução da equação apresentada acima para cada um dos períodos (meses) da simulação. Durante a solução das referidas equações são consideradas, ainda, as seguintes restrições:

1 - Quando $V_{r,i}$ ultrapassa a capacidade máxima do reservatório:

$$V_{s,i} > Q_{ab,i} \Rightarrow Q_{ab,i} = 0$$

$$V_{s,i} < Q_{ab,i} \Rightarrow Q_{ab,i} = V_{s,i} - Q_{ab,i}$$

2 - Quando o reservatório em um dado mês não conseguiu suprir a vazão retirada, vale então para esses meses:

$$Q'_{ab,i} < Q_{ab}$$

Onde, $Q'_{ab,i}$: vazão retirada nos meses secos extremos.

Quando ocorre o segundo caso, denomina-se falha do reservatório no suprimento. A garantia de abastecimento (g) para uma certa vazão regularizada pré-fixada é dada pela relação entre o número de falhas anotadas no período de simulação (nv) e o número de períodos simulados (n):

$$g = \left(1 - \frac{nv}{n}\right) * 100$$

A solução da equação do balanço hídrico e o correspondente cálculo de “ g ” para uma faixa de valores de vazão regularizada permite o estabelecimento da chamada

curva de garantia do reservatório, curva esta que relaciona vazão regularizada com níveis de garantia.

O nível de garantia adotado usualmente em estudos hidrológicos para fins hidroagrícolas no Brasil é de 90% sendo de 95% para fins energéticos, e ainda superior para fins de abastecimento humano (99%).

4.2 - CONCEITO DE VOLUME DE ALERTA

Os reservatórios da região semi-árida do nordeste do Brasil apresentam uma estrutura temporal de ocorrência de falhas caracterizada por uma alta concentração daquelas nos períodos secos, ou seja, quando ocorre uma falha esta, geralmente, não ocorre isoladamente.

As falhas que estes reservatórios apresentam podem estender-se ao longo de vários meses, ou anos, o que coloca em xeque o conceito de vazão regularizada com X % de garantia.

Nestes casos é bastante arriscado contar com uma vazão com garantia de 90%, dado que durante os restantes 10% todas as atividades sócio-econômicas da região abastecidas pelos reservatórios podem entrar em colapso.

Justifica-se, portanto, a introdução de um outro conceito que, traduzido em regra de operação, venha a minorar tais riscos (PERH-CE, 1991). Trata-se do conceito de “volume de alerta” de um reservatório, que corresponde ao volume a partir do qual apenas um percentual da vazão regularizada pode ser retirada. A introdução deste conceito na regra de operação resulta em:

$$Q_{abi} = \begin{cases} Q_r \Leftrightarrow V_{i+1} \geq V_a \\ \%Q_r \Leftrightarrow V_a \geq V_i \geq V_{min} \\ 0 \Leftrightarrow \left[V_i + Q_{ai} - E_i \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) \right] \leq V_{min} \\ Q_v < \%Q_r \Leftrightarrow V_{i+1} \geq V_{min} \end{cases}$$

$$V_{i+1} \leq V_{max} \rightarrow i=1,2,\dots,n$$

onde V_{i+1} , V_i , A_{i+1} , A_i são, respectivamente, os volumes e as áreas do espelho d'água do reservatório para os instantes de tempo i e $i+1$ da simulação; Q_{abi} é a vazão retirada; E_i é a parcela de evaporação; Q_{ai} é a vazão afluente ao reservatório, todas

respectivamente no intervalo de tempo i da simulação, V_{\min} e V_{\max} , respectivamente o volume mínimo operacional e a capacidade máxima do reservatório; Q_v , a vazão de falhas e “ n ” o número de intervalos de tempo simulados.

A figura 4.1 apresenta esquema com as diferentes situações de operação considerando volume de alerta.

4.3 - SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM RESERVATÓRIO CONSIDERANDO TRANSPOSIÇÃO

A simulação da operação de reservatórios sob a condição de adução de uma vazão transposta permite introduzir uma nova modificação na regra de operação básica. Para tanto considera-se o conceito de alerta de bombeamento, definido como o volume a partir do qual não se faz necessário o bombeamento, o que possibilita economia de energia e possíveis perdas por vertimento.

No estudo em curso escolheu-se como critério, para a determinação do volume de alerta, que os reservatórios deverão fornecer 50% da vazão regularizada com 90%, 95% ou 99% de garantia durante, respectivamente, o 10%, 5% ou 1% restante do tempo.

Neste caso a regra de operação torna-se:

$$Q_{ab_i} = \begin{cases} Q_r \Leftrightarrow V_i \geq V_a \\ \%Q_r \Leftrightarrow V_a \geq V_i \geq V_{\min} \\ 0 \Leftrightarrow \left[V_i + Q_{a_i} - E_i \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) \right] \leq V_{\min} \\ Q_v < \%Q_r \Leftrightarrow V_{i+1} \leq V_{\min} \end{cases}$$

$$Q_{sf_i} = \begin{cases} Q_p \Leftrightarrow V_i \leq V_{ps} \\ 0 \Leftrightarrow V_i > V_{ps} \end{cases}$$

$$V_{i+1} \leq V_{\max} \rightarrow i = 1, 2, \dots, n$$

onde Q_{sf} é a vazão transposta; Q_p é uma vazão bombeada definida previamente e V_{ps} é o volume de alerta de bombeamento.

A regra de operação acima descrita possibilita, portanto a determinação da vazão regularizada com X % de garantia sob o conceitos de volume de alerta do reservatório e de alerta de bombeamento.

A Figura 4.2 apresenta esquema com as diferentes situações de operação considerando volume de alerta e alerta de bombeamento.

4.4 - DOMÍNIO DE PESQUISA DA SINERGIA

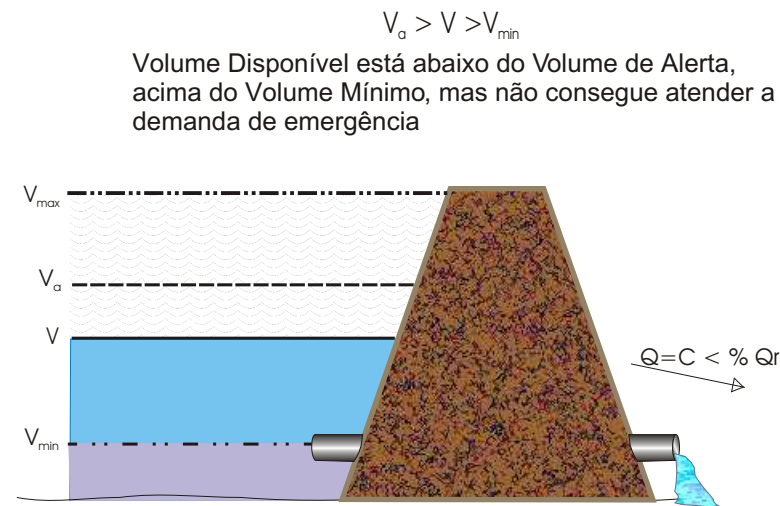
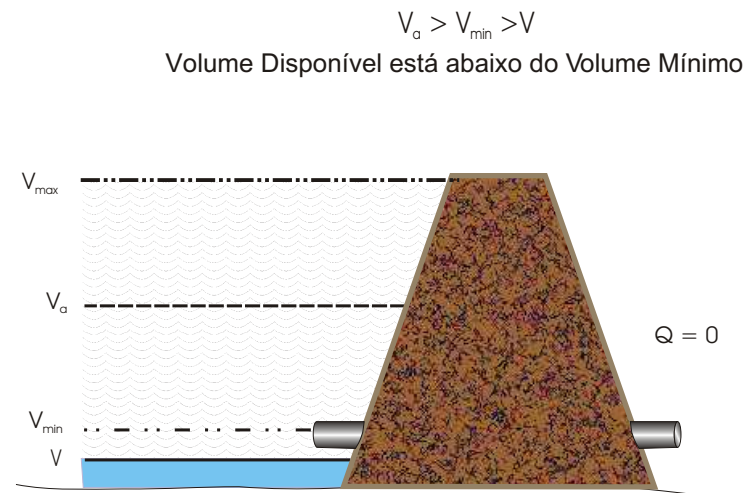
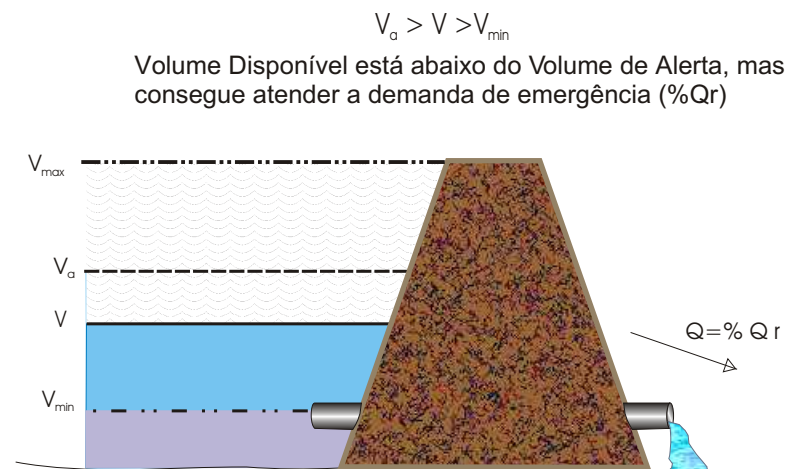
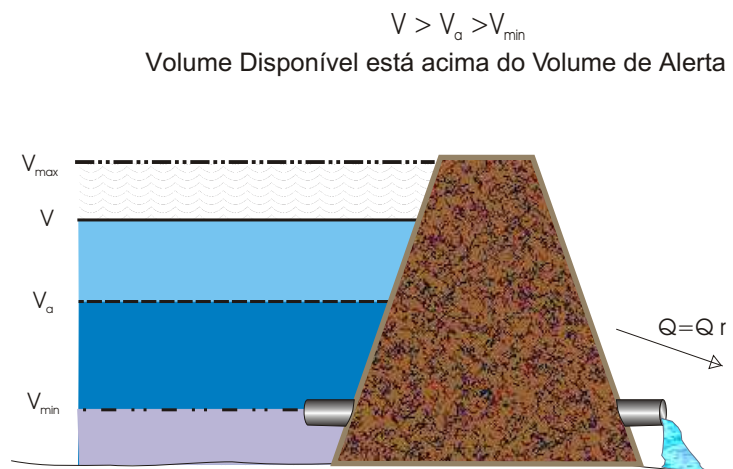
Os volumes de alerta de bombeamento a serem considerados como delimitadores do domínio de pesquisa dos ganhos sinérgicos representarão acréscimos e decréscimos percentuais do volume de alerta de bombeamento médio definido com base na solução dada pelo modelo de otimização, visto que esta incorpora em si, de forma implícita, uma otimização de caráter econômico, pois tem como parâmetro o tempo de bombeamento.

A restrição do domínio de pesquisa para o campo de variação dos ganhos sinérgicos torna-se fundamental em termos de tempo computacional e, mais enfaticamente, do ponto de vista da determinação de uma estratégia de operação que venha a aproximar-se o máximo possível do ótimo absoluto, pois a simulação da operação de reservatórios, utilizando os conceitos de volume de alerta e alerta de bombeamento, fornece um leque de soluções de grande dimensão, entre as quais apenas interessam aquelas que, sob o ponto de vista hidrológico e econômico (no estrito sentido de economia de energia, ou seja mínimo tempo de bombeamento) sejam eficientes. Conforme ressaltado a utilização conjunta dos procedimentos de otimização e simulação permite um foco direcional na zona de interesse.

4.5 - PARÂMETROS DE EXPRESSÃO DA SINERGIA

Com o objetivo de melhor explicitar a interdependência entre as variáveis envolvidas no sistema analisado (vazão regularizada, vazão transposta, tempo de bombeamento, volumes de alerta e alerta de bombeamento) faz-se necessária a introdução de indicadores que expressem mais claramente o efeito da transposição nos reservatórios, evidenciando as vazões adotadas para cada reservatório. Nesta ótica, são a seguir apresentados os referidos indicadores:

FIGURA 4.1 - Apresentação Esquemática da Operação considerando Volume de Alerta

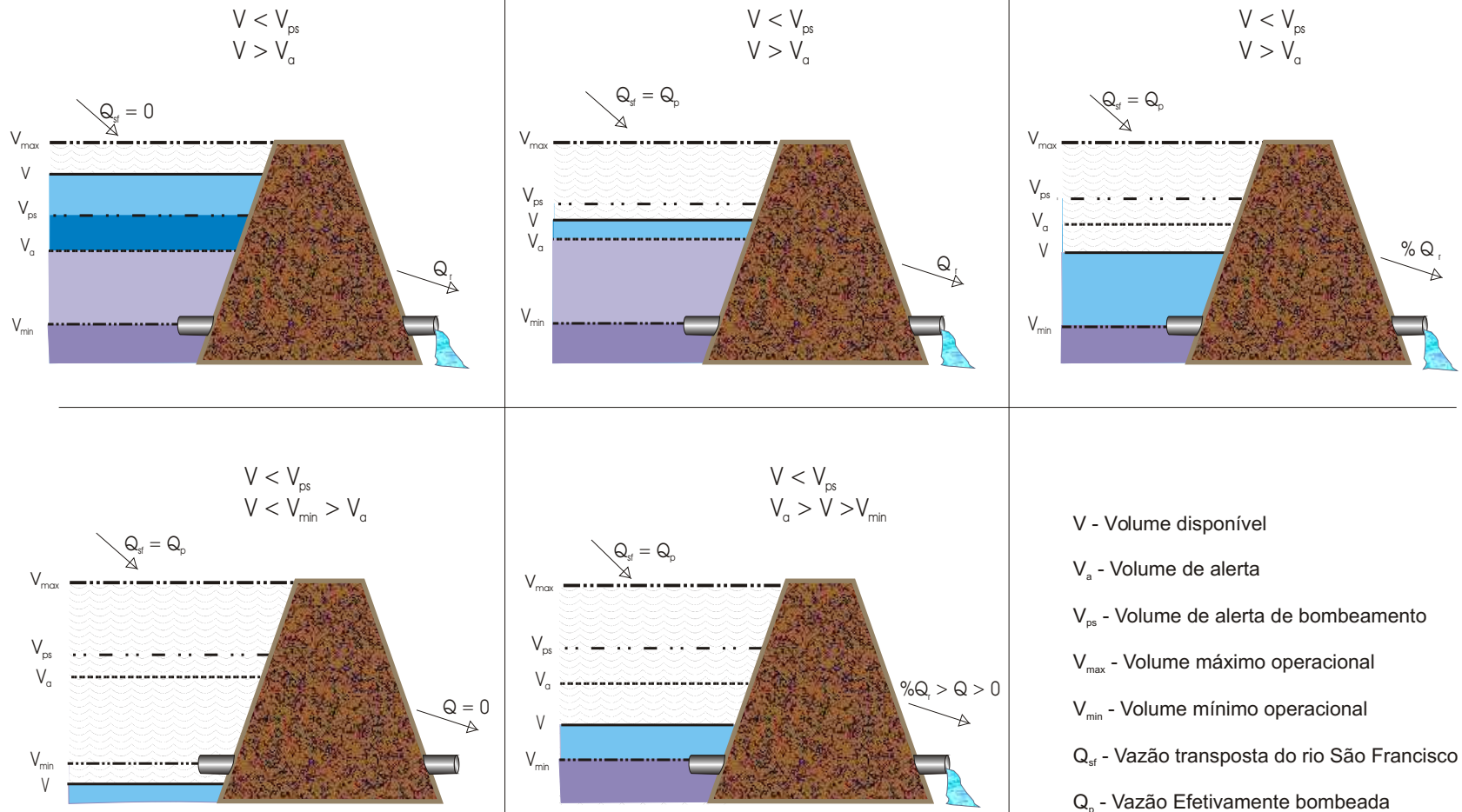


V_{ps} - Volume de alerta de bombeamento

Q_{sf} - Vazão transposta do rio São Francisco

Q_p - Vazão Efetivamente bombeada

FIGURA 4.2 - Esquema da Operação Considerado Volume de Alerta e Transposição



- **Sinergia:** entende-se aqui por sinergia, ou efeito sinérgico, a parcela de acréscimo de vazão regularizada pelo reservatório que ultrapassa o acréscimo decorrente da vazão bombeada. A Sinergia é definida como:

$$\text{Sinergia} = Q_{r-ct} - Q_{r-st} - Q_{sf} t_b / t_s$$

- **Sinergia Adimensional:** este indicador traduz uma espécie de relação benefício - custo sob uma ótica hidrológica. Nesse contexto o “benefício” é representado pelos incrementos de vazão regularizada do reservatório (Sinergia), enquanto que os custos se traduzem através da vazão efetivamente transposta. A Sinergia Adimensional é definida como:

$$\text{Sinergia Adimensional} = \frac{Q_{r-ct} - Q_{r-st} - Q_{sf} t_b / t_s}{Q_{sf} t_b / t_s}$$

- **Sinergia Marginal:** corresponde ao diferencial da Sinergia ou efeito sinérgico. A Sinergia Marginal é definida como:

$$\text{Sinergia Marginal} = \text{dif}(Q_{r-ct} - Q_{r-st} - Q_{sf} t_b / t_s)$$

- **Acréscimo marginal:** corresponde ao quociente entre a Sinergia Marginal e o diferencial de acréscimo de vazão bombeada. O Acréscimo Marginal é definido como:

$$\text{Acréscimo Marginal} = \frac{\text{dif}(Q_{r-ct} - Q_{r-st} - Q_{sf} t_b / t_s)}{\text{dif}(Q_{sf} t_b / t_s)}$$

onde Q_{r-ct} , é vazão ponderada contínua obtida a partir da vazão regularizada pelo reservatório para um determinado bombeamento; Q_{r-st} , é vazão ponderada contínua obtida a partir da vazão regularizada pelo reservatório sem bombeamentos; e $Q_{sf} t_b / t_s$, é vazão efetivamente transposta, transformada em equivalente contínua.

Estes indicadores podem ser aplicados tanto para cada reservatório quanto para o sistema global, descrevendo de forma direta os ganhos obtidos mediante a injeção de vazões em reservatórios interanuais do semi-árido.

4.6 - O MODELO UTILIZADO

O modelo utilizado nestes estudos utiliza o algoritmo denominado “MODSIM”, desenvolvido por Jhon Labadie² com a interface denominada MODSIMP32 desenvolvida na EPUSP pelo prof. Rubem La Laina Porto.

Esta consiste num modelo híbrido de simulação de uma rede de canais, reservatórios e centros de demanda onde, em cada intervalo de tempo de simulação, são atendidas as demandas e definidos os níveis de armazenamento nos reservatórios mediante a solução de um sistema de equações lineares composto por restrições e por uma função objetivo que tende a minimizar os “custos fictícios” representados por penalizações associadas com cada elemento do sistema e arbitradas pelo usuário.

Este tipo de modelo permite conjugar as vantagens dos modelos de simulação que submetem os sistema hídricos a condições de operação similares às que ocorrem na prática (futuro desconhecido), facilitando a busca por soluções eficientes, dado que a alocação de estoques de água é feita sempre sob condições “ótimas”, associadas com as restrições e penalizações impostas a um determinado elemento do sistema e sob as condições de incerteza das vazões afluentes futuras.

Por exemplo, é usual saber que um determinado reservatório não deve operar com estoques inferiores a um determinado volume, sob risco de entrar em colapso.

Este volume de referência, conhecido como volume de alerta, é um volume tal que permite ao reservatório atender as demandas emergências associadas ao mesmo em condições de escassez.

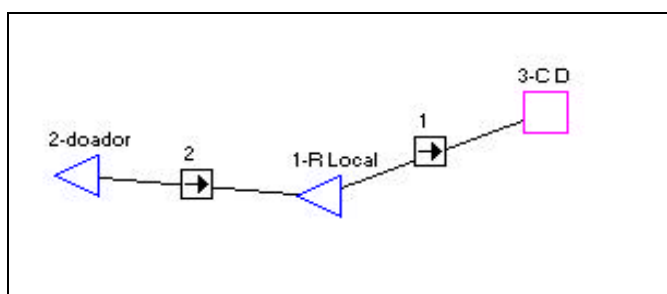
Assim, para este volume “alvo”, na metodologia empregada, é definida uma determinada prioridade que será maior do que a prioridade associada com a restrição de bombeamento do canal que converge para este reservatório e inferior à prioridade de atendimento das demandas associadas ao mesmo reservatório.

Estas prioridade são expressas em função de custos fictícios pela prática de uma determinada ação, no caso de uma condução de águas ou de um centro de

demandas o custo é diretamente proporcional à vazão aduzida ou fornecida, no caso de um reservatório o custo é proporcional ao afastamento entre o volume estocado num determinado instante de tempo e o armazenamento “alvo”.

Vejamos o seguinte exemplo, para que o reservatório doador da figura 4.3 libere águas para o reservatório local deve ocorrer a seguinte situação: Custo de perda de água no doador + Custo de adução no canal 2 < Custo de armazenar água no reservatório local

Fig. 4.3 – Exemplo de sistema doador - receptor



Isto pode ser obtido mediante a definição de um volume alvo bastante baixo no reservatório doador, um custo reduzido na adução e um custo elevado associado com o volume de alerta no reservatório local.

Não obstante, após atingir o volume alvo (dado que o custo é calculado pelo afastamento em relação ao mesmo), os custos de transportar águas passaram a ser maiores dos que seriam “pagos” no reservatório local, optando-se pela não transposição de águas.

Do mesmo modo, para que o centro de demandas mostrado na figura seja atendido, o custo de armazenamento de águas no reservatório local deverá ser maior do que o custo associado ao atendimento do centro de demandas.

Esta lógica permite configurar redes de canais, reservatórios e centro de demandas tão complexas quanto seja necessário, onde resulta relativamente simples

² Interactive River Basin Network Flow, Jhon Labadie, Colorado State University, <http://140.218.6.36/modsim/manuals/modsim/modsim.html>

estabelecer prioridades de atendimento de diferentes tipos de demanda e regras operacionais para os reservatórios e os canais de adução.

4.7 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAG4

O MAG-4 foi aplicado a rede de reservatórios de médio e grande porte da bacia, de forma a maximizar o suprimento das demandas hídricas locais para, numa segunda etapa, trabalhar com a hipótese de se concretizar a construção do Ramal Leste do Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional que prevê a adução de importantes vazões para a região. A topologia da rede de reservatórios e centros de demanda simulados na bacia do rio Paraíba é apresentada na Figura 4.4. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

A Tabela 4.1, apresenta os montantes e garantias associadas a cada centro de demandas estudado. Para os reservatórios que apresentavam vazões regularizadas de porte considerável, como no caso dos reservatórios de Epitácio Pessoa, Acauã, Camalau e Cordeiro, as demandas foram atendidas conforme a metodologia do volume de alerta; isto é, com uma garantia de 90%, sendo que durante o período de falha, pelo menos 50% da demanda deve ser atendida.

Tabela 4.1: Vazões e garantias associadas a cada centro de demandas estudado.

DEMANDA	Duração Máxima da Falha	% falha	Vazão (m3/s)	GARANTIA
Acauã - P	2	0.22	0.45	99.78
Acauã - NP	42	10.78	0.45	89.22
Congo-P	0	0.00	0.15	100.00
Congo-NP	28	10.78	0.15	89.22
Camalau-P	0	0.00	0.10	100.00
Camalau-NP	25	9.78	0.10	90.22
Campina Grande-P	0	0.00	1.50	100.00
Campina Grande-NP	22	10.78	1.50	89.22
Poções-D	18	10.33	0.13	89.67
Soledade-D	21	10.78	0.07	89.22
Sumê-D	24	10.00	0.30	90.00
Taperoa 2-D	20	13.56	0.01	86.44
Serra Branca-D	95	46.11	0.01	53.89
Sto Antônio	59	33.33	0.01	66.67

Tabela 4.2: Principais indicadores do comportamento dos reservatórios durante a simulação.

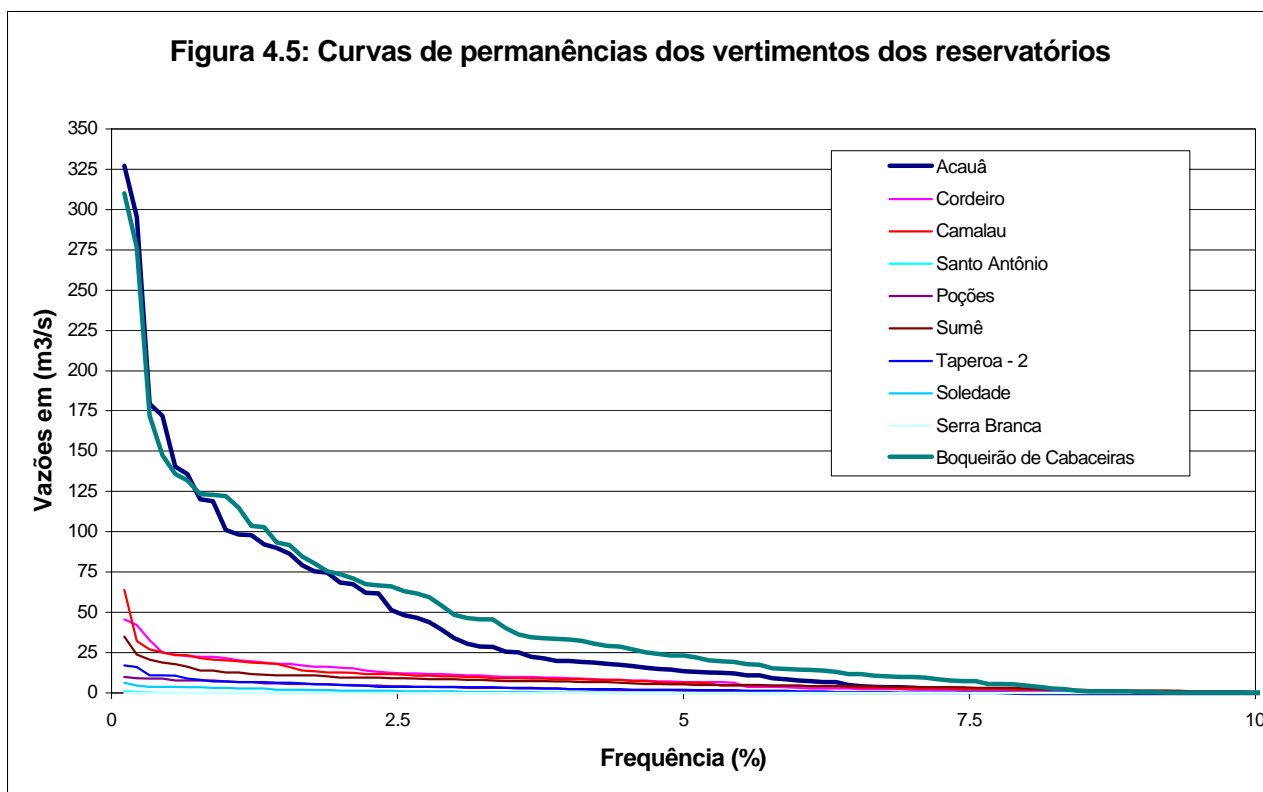
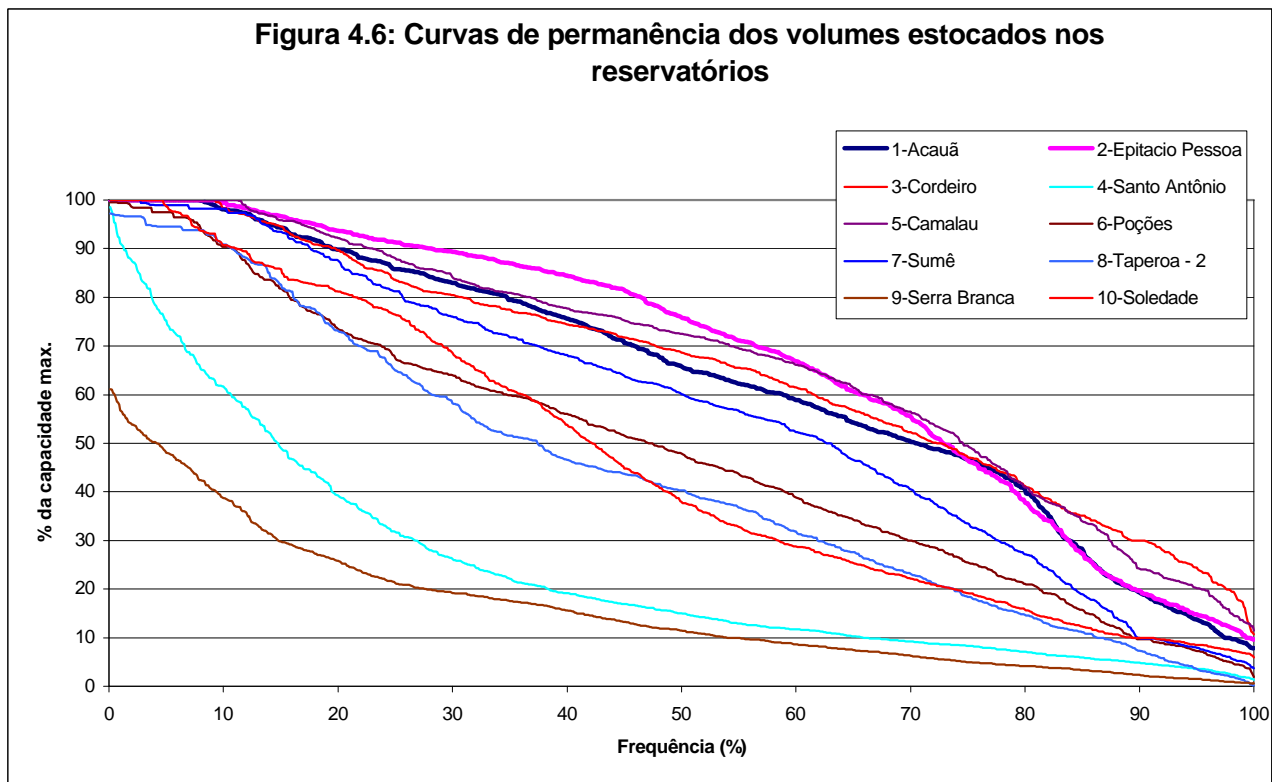
Reservatórios	V máximo (Mm3)	V mínimo (Mm3)	V inicial (Mm3)	V de Alerta (% volume máximo)	V afluente médio anual (Mm3)
1-Acauã	250.00	25.00	125.00	20.00%	170.82
2-Epitacio Pessoa	535.70	53.00	250.00	20.00%	242.40
3-Cordeiro	69.97	6.90	35.00	30.00%	50.79
4-Santo Antônio	21.42	2.10	10.00	SVA	3.21
5-Camalau	46.44	4.60	23.00	24.00%	42.93
6-Poções	29.87	2.90	15.00	SVA	19.08
7-Sumê	36.80	3.60	18.00	SVA	38.83
8-Taperoa - 2	15.15	1.50	7.50	SVA	17.51
9-Serra Branca	14.04	1.40	7.00	SVA	1.26
10-Soledade	27.06	2.70	13.50	SVA	8.04
Reservatórios	V evaporado médio anual (Mm3)	V vertido médio anual (Mm3)	Frequência com que houve vertimento (%)	V regularizado médio anual (Mm3)	Relação Capacidade / V afluente médio anual
1-Acauã	29.48	133.90	7.89	26.46	1.46
2-Epitacio Pessoa	18.98	115.39	11.89	87.90	2.21
3-Cordeiro	14.73	27.22	9.56	8.85	1.38
4-Santo Antônio	3.02	27.18	0.33	0.21	6.68
5-Camalau	9.84	0.08	11.33	5.92	1.08
6-Poções	8.14	7.48	6.56	3.65	1.57
7-Sumê	8.74	21.65	12.11	8.46	0.95
8-Taperoa - 2	8.39	9.03	8.67	0.27	0.87
9-Serra Branca	1.19	0.00	0.00	0.17	11.13
10-Soledade	3.33	3.10	6.00	4.51	3.37

Isto foi realizado mediante a desagregação das mesmas em duas componentes idênticas, uma denominada “prioritária”, para a qual desejasse uma garantia de 99-100% e uma componente denominada “não prioritária”, com garantia da ordem de 90%.

A menor vazão considerada foi de 10 l/s, assim, os reservatórios com menor capacidade de regularização foram operados com uma retirada de 10 l/s mesmo que as garantias obtidas sejam pouco satisfatórias. É o caso dos reservatórios de Taperoa-2, Serra Branca e Santo Antônio.

A Tabela 4.2 apresenta os principais indicadores do comportamento dos reservatórios durante as simulações. Na mesma são apresentadas as afluências médias, montantes médios evaporados e vertidos e sua respectiva frequência. São apresentados também os volume de alertas, quando considerados na simulação, como uma fração do volume máximo dos reservatórios.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam as curvas de permanência dos vertimentos e dos volumes estocados em cada reservatório, respectivamente.

Figura 4.5: Curvas de permanências dos vertimentos dos reservatórios**Figura 4.6: Curvas de permanência dos volumes estocados nos reservatórios**

5 - MODELO MAG 5 (MODELO DE QUALIDADE D'ÁGUA)

A crescente preocupação com os aspectos qualitativos dos recursos hídricos reflete-se na gestão hídrica através da crescente necessidade de avaliação, monitoramento e controle da qualidade dos mananciais.

Nesse sentido, adotou-se como base para o MAG-5 o conhecido programa QUAL2E, originário desenvolvido para a EPA.

O QUAL2E é um modelo de simulação de qualidade d'águas fluviais que distingue-se tanto por sua versatilidade, como pela sua abrangência, com capacidade para simular 15 componentes, quaisquer que sejam as combinações desejadas, listados a seguir:

1. oxigênio dissolvido;
2. demanda bioquímica de oxigênio (DBO);
3. temperatura;
4. algas, como clorofila a;
5. nitrogênio orgânico, como N;
6. amônia, como N;
7. nitrito, como N;
8. nitrato, como N;
9. fósforo orgânico, como P;
10. fósforo dissolvido, como P;
11. coliformes;
12. constituinte conservativo arbitrário;
13. três constituintes conservativos.

O modelo se aplica bem a redes de drenagem dendríticas com fluxo bem misturado, assumindo que os mecanismos de transporte e dispersão somente são consideráveis ao longo da direção de fluxo principal.

Várias situações podem ser reproduzidas pelo QUAL2E, como descargas múltiplas de águas servidas, fluxo de tributários, e afluência e efluência incrementais. Pode-se reproduzir ainda, vazão requerida de diluição ou incremento de fluxo para controle de níveis de oxigênio dissolvido.

Utilizando o QUAL2E para análise de sistemas com escoamento permanente, pode-se estudar o impacto de cargas poluidoras (magnitude, qualidade e localização) na qualidade de águas interiores e mesmo, em conjunção com dados de campo, identificar fontes não localizadas de cargas poluidoras.

Por outro lado, a operação do modelo de forma dinâmica permite analisar o efeito de variações diurnas em dados meteorológicos sobre a qualidade d'água (sobretudo oxigênio dissolvido e temperatura), além de variações devidas à crescimento e respiração de algas.

5.1 - DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

A equação mais importante para o modelo QUAL2E é a clássica equação de transporte de massa que considera a advecção e dispersão do processo. Essa equação é integrada espacial e temporalmente para cada indicador da qualidade d'água.

O mecanismo representado nessa equação inclui os efeitos de advecção, dispersão, diluição, reações dos indicadores de qualidade d'água e interações entre eles, além de fontes e sumidouros.

A equação de transporte pode ser expressa por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \left(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} dx - \frac{\partial (A_x \bar{u} C)}{\partial x} dx + (A_x dx) \frac{dC}{dt} + s \quad 5.1$$

onde M: massa; x: distância; t: tempo; C: concentração; A_x área da seção; D_L : coeficiente de dispersão; \bar{u} : velocidade média; e s: fontes ou sumidouros externos.

Tendo em vista que $M = VC$, pode-se escrever:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial(VC)}{\partial x} = V \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{dV}{dt} \quad 5.2a$$

onde $V = A_x dx$: volume incremental.

Assumindo escoamento permanente a equação 5.2a passa a forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial t} \quad 5.2b$$

Combinando as equações 5.1 e 5.2b e rearranjando os termos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial\left(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x}\right)}{A_x \partial x} - \frac{\partial\left(A_x \bar{u} C\right)}{A_x \partial x} \frac{dC}{dt} + \frac{s}{v} \quad 5.3$$

Os termos do lado direito dessa equação representam, respectivamente, dispersão, advecção, mudanças nos constituintes, fontes e sumidouros externos e diluição. O termo $\frac{dC}{dt}$ refere-se somente à alterações como decaimento ou incremento do constituinte, não devendo ser confundido com o termo $\frac{\partial C}{\partial t}$, gradiente de concentração local. Esse último termo inclui os efeitos de mudanças no constituinte, como dispersão, advecção, fontes e sumidouros e diluições.

As alterações que ocorrem individualmente aos constituintes, independentemente de advecção e dispersão, são definidos pelo termo $\frac{dC}{dt}$.

As características hidráulicas do escoamento são reproduzidas pela aplicação da clássica equação de Manning ao escoamento de canais.

Além dos mecanismos anteriormente expostos, o QUAL2E possui a capacidade de reproduzir as reações dos constituintes e suas interrelações. Dentre esses constituintes um dos mais importantes indicadores da qualidade d'água simulados é a concentração de oxigênio dissolvido.

Esse constituinte é controlado por vários fatores, como: reatuação atmosférica, fotossíntese, respiração animal e vegetal, demanda bioquímica de oxigênio, nitrificação, salinidade e temperatura, sendo sua modelagem bastante complexa pelo número de fatores.

Outrossim, cada constituinte, em particular, possui mecanismos próprios de respostas às condições do meio hídrico e de interrelacionamento com os outros constituintes, que são discutidos em LINFIELD e BARNWELL (1987), especificamente com relação à modelagem realizada pelo QUAL2E.

5.2 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAG5

O modelo QUAL2E foi aplicado à Bacia do Rio Paraíba visando simular os processos de contaminação por coliformes fecais e o impacto do lançamento de efluentes sanitários sobre as concentrações de oxigênio dissolvido e da demanda bioquímica de oxigênio, considerando o ano 2.000 como cenário de demandas hídricas.

Essa aplicação do QUAL2E tem o objetivo de complementar o estudo de qualidade d'água da Bacia do Rio Paraíba, apresentado no Relatório Parcial I, não pretendendo, no entanto, deter-se na discussão dos resultados do modelo, que na realidade atende ao esforço de disponibilizar ferramentas para o manejo posterior dos dados e informações obtidos no presente estudo.

A rede de drenagem da bacia foi discretizada em 22 trechos, englobando desde as cabeceiras dos riachos Caiçara (que passa a ser o próprio Paraíba após a confluência com o Riacho do Meio), do Meio, Prata, do Padre e Bodocongó, além do Rio Taperoá até o Açude Acauã, conforme esquema apresentado na Figura 5.1. A caracterização hidráulica desses trechos é apresentada na Tabela 5.1.

As condições iniciais das águas dos trechos de rio simulados tomam como referência os parâmetros preconizados para os corpos d'água de Classe I, segundo a Resolução CONAMA Nº 20, na qual se enquadrariam, em condições naturais o Rio Paraíba e seus afluentes.

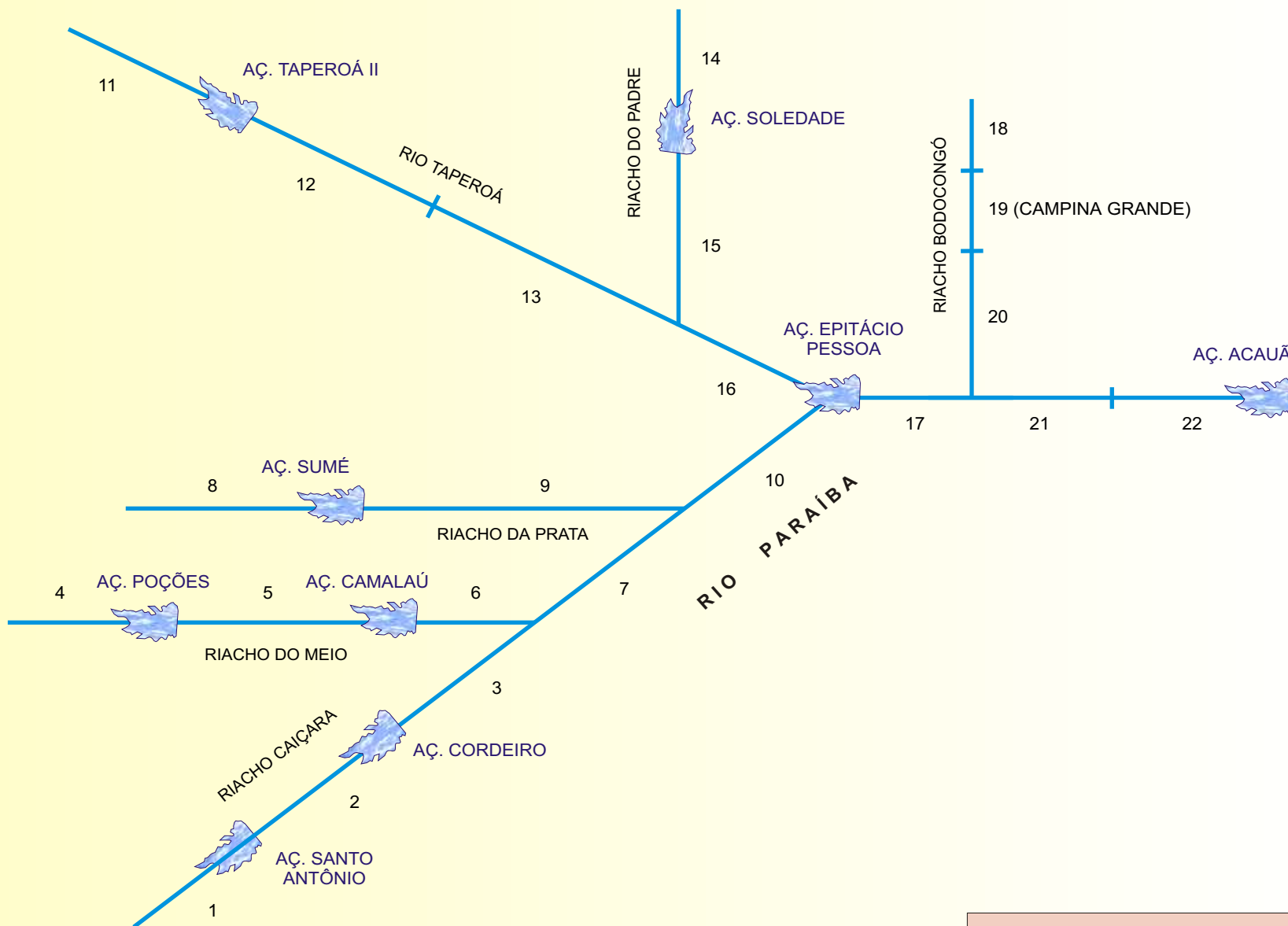


FIGURA 5.1
DISCRETIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM PARA
SIMULAÇÃO DO QUAL2E

Tabela 5.1 – Caracterização hidráulica dos trechos simulados

	Trecho	Curso d'água	Comp. (m)	Decl. (m/m)	Largura (m)	Manning
1	Nascente -> St. Antônio	Rch. Caiçara	8	0.0070	3	0.025
2	St. Antônio -> Aç. Cordeiro	Rch. Caiçara	52	0.0028	10	0.025
3	Aç. Cordeiro -> Confluência Riacho do Meio	Rch. Caiçara	12	0.0008	20	0.025
4	Nascente - Aç. Poções	Rch. Do Meio	24	0.0118	5	0.025
5	Aç. Poções -> Aç. Camalaú	Rch. Do Meio	40	0.0027	8	0.025
6	Aç. Camalaú -> Confluência Riacho Caiçara	Rch. Do Meio	16	0.0012	20	0.025
7	Confluência Riacho Caiçara -> Confluência Riacho da Prata	Rch. Do Meio	12	0.0032	40	0.020
8	Nascente -> Aç. Sumé	Rch. Da Prata	24	0.0085	10	0.025
9	Aç. Sumé -> Confluência Riacho do Meio	Rch. Da Prata	44	0.0023	50	0.020
10	Confluência Riacho do Meio - Aç. Epitácio Pessoa	Rio Paraíba	32	0.0016	60	0.020
11	Nascente -> Aç. Taperoá	Rio Taperoá	40	0.0022	5	0.025
12	Aç. Taperoá -> Confluência Riacho do Padre (1)	Rio Taperoá	36	0.0015	10	0.020
13	Aç. Taperoá -> Confluência Riacho do Padre (2)	Rio Taperoá	36	0.0015	50	0.020
14	Nascente -> Aç. Soledade	Rch. Do Padre	24	0.0042	5	0.025
15	Aç. Soledade -> Confluência Rio Taperoá	Rch. Do Padre	44	0.0020	15	0.025
16	Confluência Riacho do Padre -> Aç. Epitácio Pessoa	Rio Taperoá	16	0.0023	70	0.020
17	Aç. Epitácio Pessoa -> Confluência Riacho Bodocongó	Rio Paraíba	20	0.0024	80	0.020
18	Nascente -> entrada Campina Grande	Rch. Bodocongó	20	0.0125	5	0.025
19	Sede municipal Campina Grande	Rch. Bodocongó	12	0.0037	15	0.025
20	Saída Campina Grande -> Confluência Rio Paraíba	Rch. Bodocongó	44	0.0043	25	0.025
21	Confluência Riacho Bodocongó - Aç. Acauã (1)	Rio Paraíba	44	0.0019	80	0.020
22	Confluência Riacho Bodocongó - Aç. Acauã (2)	Rio Paraíba	40	0.0019	80	0.020

As cargas poluentes foram consideradas fundamentalmente aquelas geradas por esgotos domésticos urbanos, baseadas nos valores apresentados por SPERLING (1996), adotando-se uma taxa de retorno de 80% da demanda hídrica, estando apresentadas na Tabela 5.2 as vazões de efluentes sanitários simuladas.

Como ilustração dos resultados obtidos com a utilização do QUAL2E, apresenta-se na Figura 5.2 o perfil de concentração de DBO ao longo do Rio Paraíba, salientando-se o incremento desse parâmetro quando do lançamento das cargas poluidoras, e o processo de depuração que reduz as concentrações de DBO ao longo do rio.

Tabela 5.2 – Vazões efluentes sanitárias

Município	Trecho	Elemento	População	Fluxo esgoto (l/s)
Zabelê	1	2	906	1.4
S. S. Umbuzeiro	2	1	2024	3.1
S. J. do Tigre	2	7	925	1.4
Congo	3	2	2008	3.1
Monteiro	4	6	16293	27.5
Camalaú	5	10	2329	3.6
Ouro Velho	8	2	1775	2.8
Prata	8	2	2073	3.2
Amparo	8	4	706	1.1
Sumé	9	1	10216	17.2
Caraúbas	10	3	986	1.5
Coxixola	10	5	601	0.9
S. D. do Cariri	10	6	763	1.2
B. de São Miguel	10	7	1927	3.0
Desterro	11	4	3725	5.8
Cacimbas	11	6	1529	2.4
Taperoá	12	1	7323	12.3
Parari	12	9	286	0.4
Serra Branca	13	5	7437	12.5
S. J. do Cariri	13	6	1429	2.2
Olivedos	14	4	1272	2.0
Soledade	15	1	8139	13.7
Cabaceiras	16	4	1590	2.5
Boqueirão	17	2	10842	18.3
B. de Santana	17	4	511	0.8
Puxinanã	18	2	2974	4.6
C. Grande	19	2	316112	500.0
Caturité	20	6	708	1.1
R. S. Antônio	21	3	801	1.2
Alcantil	21	3	951	1.5
S. Cecília	21	6	935	1.5
G. Bravo	21	9	620	1.0
Aroeiras	22	2	5883	9.9
Umbuzeiro	22	2	3316	5.2
Natuba	22	5	3088	4.8

Figura 5.2 – Perfil de DBO ao longo do Rio Paraíba

