

10 – Inventário Hidrológico Superficial

Este capítulo tem por objetivo estimar as potencialidades e fornecer as informações necessárias quanto a quantidade dos recursos hídricos superficiais, para que, no capítulo 12, se possa calcular as disponibilidades efetivas na bacia do rio Gramame para diversos cenários de demanda e de oferta de água.

A potencialidade hídrica de uma bacia hidrográfica representa a quantificação dos recursos hídricos sem a intervenção humana, ou seja em seu estado natural. É representada pela média aritmética da série de vazões naturais no exutório da bacia ou da sub-bacia considerada. A série histórica de vazões deve ser suficientemente extensa para representar corretamente o regime fluvial do rio e para que a média aritmética possa ser considerada um bom estimador da vazão média.

A disponibilidade hídrica constitui a parcela da potencialidade ativada pela ação do homem para o seu aproveitamento. De uma maneira geral a disponibilidade é sensivelmente inferior a potencialidade. O conceito de disponibilidade envolve localização, tipo de uso e conceito de garantia ou risco em atender uma determinada vazão. Em uma bacia hidrográfica a disponibilidade em um determinado local pode depender dos usos da água em outra localização.

A disponibilidade efetiva em recursos hídricos, é conceituada, como aquela que, para uma determinada situação de Infra-estrutura hidráulica, corresponda à uma utilização possível da água com uma dada garantia de fornecimento, definindo-se como garantia, a frequência com que um fornecimento é completamente assegurado. Aqui, utiliza-se o critério empírico, que define garantia como a relação entre o número de meses durante os quais o fornecimento de um dado volume é completamente satisfeito e o número total de meses do período de estudo. Observa-se pois, que a disponibilidade efetiva em recursos hídricos é intrinsecamente relacionada ao atendimento das demandas atuais e futuras assim como à operação do sistema hídrico. Mapas de disponibilidades efetivas podem então ser desenhados para diversos cenários de infra-estrutura assim como de uso da água.

Outros valores interessantes característicos dos recursos hídricos superficiais de uma bacia são as vazões de referência Q_{90} em diversos pontos da bacia assim como as vazões regularizadas pelos açudes. Correspondem na realidade a uma disponibilidade potencial, já que associada a infra-estrutura existente, mas não efetiva, pois não depende do uso da água.

Na maioria das bacias e sub-bacias hidrográficas no Brasil e ainda mais especificamente na região Nordeste, as séries históricas de vazões disponíveis são curtas, pouca representativas da distribuição espacial das vazões e muitas vezes perturbadas por açudes ou obras a montante no curso da água. Ao contrário, as informações relativas às precipitações são melhor distribuídas no espaço, e, freqüentemente representam séries relativamente longas. Desta forma, a estimativa das potencialidades e disponibilidades hídricas requer estudos hidrológicos diversos visando aprimorar o conhecimento da hidrologia da bacia em estudo, através de um levantamento de todas as informações disponíveis na bacia e comparação com outras bacias da região, utilizando para tanto técnicas de regionalização hidrológica; geração de séries pseudo-históricas de vazões através do uso de modelos de transformação chuva-vazão e eventualmente extensão dessas séries por modelização estocástica ou outra.

Os estudos efetuados neste capítulo serão divididos em três partes:

A)- A compilação das informações disponíveis na bacia hidrográfica do rio Gramame, assim como em outras bacias hidrográficas da região. Neste contexto, em termos de informações hidroclimatológicas, apenas os dados fluviométricos serão tratados, já que os dados climatológicos foram apresentados e analisados no capítulo 4.

B)- Estudos hidrológicos. Os estudos hidrológicos tem por objetivo fornecer a necessária compreensão do regime hidrológico da bacia, assim como todas as informações necessárias para o cálculo das potencialidades e disponibilidades. Estes serão compostos dos seguintes estudos sequenciais

- Análise de consistência dos dados fluviométricos
- Análise estatística dos dados fluviométricos
- Regionalização dos dados fluviométricos
- Geração sintética de séries pseudo-históricas de vazão utilizando um modelo chuva-vazão.
- Geração sintética de séries longas de vazão por modelo estocástico.

C)- Estimativa das potencialidades hídricas superficiais e determinação das vazões de referências. A elaboração de mapas de disponibilidades efetivas, para diversos cenários de infra-estrutura (oferta de água) e de demanda (uso da água), é efetuada no capítulo 12, que trata do balanço entre demandas de água e ofertas reais atuais e planejadas de água.

10.1 – Compilação das informações disponíveis

10.1.1 – Informações fluviométricas disponíveis na bacia hidrográfica do rio Gramame.

Na bacia hidrográfica do rio Gramame, três postos fluviométricos foram operados pela CAGEPA a partir de 1971. Três medições limnimétricas diárias eram feitas, e, a partir destas, o nível médio diário da água no rio era calculado. Na tabela 10.1, constam os nomes dos postos fluviométricos com as suas respectivas coordenadas e área de drenagem medida nas cartas topoaltimétricas digitalizadas em AUTOCAD. Na figura 10.1, os postos fluviométricos são localizados na bacia hidrográfica

Tabela 10.1 – Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Gramame

Nome	Código	Rio	Coordenadas UTM		Área de drenagem (km ²)
			Latitude	Longitude	
Faz. Mumbaba	-	Mumbaba	9204,79	285,81	163,40
Faz. Mamuaba	-	Mamuaba	9195,50	281,00	121,20
Faz. Santo Antônio	-	Gramame	9194,46	284,71	125,80

Não existe dados de descarga no rio Água Boa, nem no rio Gramame a jusante da confluência com o rio Mumbaba, ou seja, não se dispõe de nenhuma informação fluviométrica sobre a parte oriental da bacia hidrográfica. As áreas de drenagem dos três postos fluviométricos operados pela CAGEPA são de dimensões relativamente similares.

Das observações efetuadas nestes postos, muitas foram perdidas. A seguir, descreve-se as informações que foram resgatadas nas diversas pastas e relatórios encontrados na CAGEPA.

- Dados de níveis diários nos rios

Tabela 10.2 – Períodos de observações disponíveis de níveis diários

Rio	Período
Gramame	Janeiro 1980 – Fevereiro 1986
Mamuaba	Maio 1985 – Julho 1987
Mumbaba	Janeiro 1980 – Janeiro 1984

- Dados de níveis no rio e vazões médias mensais

Nestas fichas aparecem os valores médios mensais dos níveis médios, máximo e mínimo diários assim como o valor da vazão correspondente calculado a partir das curvas-chave. As curva-chaves não foram encontradas nos relatórios da CAGEPA.

FIGURA 10.1 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS

Tabela 10.3 – Períodos de observações disponíveis de níveis mensais e vazões correspondentes

Rio	Período
Gramame	Janeiro 1975 – Junho 1978
Mamuaba	Janeiro 1975 – Abril 1982
Mumbaba	Janeiro 1975 – Abril 1982

Nestas mesmas fichas, constam também dados de níveis médios máximo e mínimo mensais no período de Junho 1972 a Janeiro 1974, sem todavia ter sido estes transformados em vazões.

- Dados de lâminas escoadas diárias

Na dissertação de mestrado de Diniz (1994), são apresentadas tabelas com as lâminas diárias do rio Mamuaba, em mm, nos anos de 1972, 1973 e 1974.

- Dados de lâminas escoadas mensais

No relatório da TECNOSAN, sem data, da CAGEPA, intitulado “Análise técnica de alternativas de alteamento das barragens de Gramame e Mamuaba”, constam as lâminas escoadas mensais para os rios Gramame, Mamuaba e Mumbaba, no período de 1972 a 1978.

Num relatório interno da CAGEPA datado de 1994, intitulado “Sistema de abastecimento de água da Grande João Pessoa – Estudos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Mumbaba”, um estudo técnico preliminar é efetuado para verificar a possibilidade de construção de uma barragem no rio Mumbaba. Quatro alternativas foram estudadas em dois eixos potencialmente barráveis.

No decorrer deste trabalho a SCIENTEC tem efetuado medições de vazão em diversos rios da bacia hidrográfica. Estas medições foram efetuadas após um longo período com pouca chuva e são indicativos das menores vazões do rio. Os resultados são apresentados na tabela 10.4. Os pontos de medição estão localizados na figura 10.2.

Tabela 10.4 – Medições de vazão nos rios da Bacia do Rio Gramame

Rio	Local	Data	Vazão (l/s)	Precipitação na semana anterior (mm)	Coordenadas UTM	
					Latitude (km)	Longitude (km)
Água Boa	Sítio Amparo Conde-PB	09/11/99	126,2	0,0	9199,05	288,37
	Sítio Amparo Conde-PB	09/12/99	172,1	9,4		
Gramame	A jusante da Giasa	19/11/99	80,3*	0,0	9188,37	279,19
Mumbaba	A montante da ponte na propriedade do Sr. João Travassos	18/11/99	449,6	0,0	9204,68	286,23
		23/11/99	462,8	0,0		
Mamuaba	Propriedade da Sr. Ariosvaldo Almeida	19/11/99	374,4	0,0	9196,29	279,39

FIGURA 10.2 – PONTOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

* Não foi verificado no período de medição se havia retirada de água por parte da Giasa a montante da seção de medição.

10.1.2 – Informações disponíveis relativas à Reservatórios de água na bacia hidrográfica do rio Gramame

10.1.2.1 – A barragem de Gramame Mamuaba

O complexo de Gramame-Mamuaba é constituído de duas barragens, sendo uma no rio Gramame e outra no rio Mamuaba. As duas barragens comunicam através de um canal cujas cotas da soleira são respectivamente, 28,59 m no açude Gramame e 28,61 m no açude Mamuaba. No açude de Gramame, existe um vertedouro cuja soleira encontra-se na cota 35 m. Os dois açudes podem ser operados simultaneamente ou separadamente através de válvulas dispersores com tomadas de água nas cotas 18,80 m no açude de Gramame e 20,30 m no açude de Mamuaba. A construção do complexo foi finalizada em 1990, sendo que os açudes começaram a acumular água em Agosto de 1988.

No anexo 1 são reproduzidas as fichas cadastrais dos açudes de Gramame, Mamuaba e do conjunto Gramame – Mamuaba, obtidas da CAGEPA. O conjunto tem uma capacidade de armazenamento de 56.937.000,0 m³, sendo 26.231.000,0 m³ do açude Mamuaba e 30.706.000,0 m³ do açude Gramame. Nessas fichas não constam os valores de área.

Procurou restituir-se para cada cota os valores de área para os açudes de Gramame e Mamuaba, pela equação:

$$A(i+1) = 2 \frac{(V(i+1) - V(i))}{\Delta h} - A(i)$$

Com esta equação, os valores de área foram freqüentemente incoerentes em ambos os casos, indicando valores errôneos de volumes. Procurou-se então estabelecer para a relação cota-volume, uma relação exponencial da forma:

$$V = K.H^\alpha$$

onde K e α são parâmetros de forma e H é a maior profundidade do açude. A partir desta equação, deduz-se analiticamente a relação cota-área:

$$A = K.\alpha.H^{(\alpha-1)}$$

Obteve-se K = 407,688 e $\alpha = 4,323$ para o açude Gramame, e, K = 14.219,91 e $\alpha = 2,601$ para o açude Mamuaba. No caso do açude Mamuaba, o coeficiente de ajustamento é igual a 0,99, o que garante uma excelente aproximação para os valores de área assim calculados. Já no caso do açude Gramame, o valor de r^2 foi menor e passou a 0,99 quando ajustou-se a curva V(H) a partir da cota 26. Desta forma, entre as cotas 17 e 25, o cálculo da

área foi feito em função dos volumes $V(i)$ e $V(i+1)$, e a partir da cota 26, com os valores dos coeficientes K e α . Na tabela 10.5, constam os valores das relações cota-área-volume, assim restituídos.

10.1.2.1 – A barragem planejada para o rio Mumbaba

Está em planejamento uma barragem de acumulação de $41 \times 10^6 \text{ m}^3$, para regularizar 1.600 l/s no Rio Mumbaba, logo a montante da barragem de nível atual. A curva cota-área-volume da barragem planejada encontra-se no anexo 2

10.1.2.3 – Pequenas barragens na bacia

Pequenas barragens foram observadas na bacia hidrográfica. Levantamento das suas coordenadas, assim como de outras informações foi feito, o que permitiu a elaboração das fichas cadastrais apresentadas no anexo 3. O volume da água represada por essas barragens foi estimado em 430.500 m^3 utilizando o método de Molle em SUDENE (1992). Essas pequenas barragens estão localizadas no mapa da figura 10.3.

10.1.3 Informações disponíveis em outras bacias hidrográficas da região.

Neste parágrafo será feita uma síntese dos estudos sobre recursos hídricos em bacias hidrográficas litorâneas em uma região que do ponto de vista climatológico e fisiográfico se assimila à região em estudo neste plano. Também, essa compilação de informações será orientada à estudos com objetivos similares, quais sejam a realização de planos diretores de bacias, e outros quando mais específicos da região em estudo.

Na região leste do Nordeste Brasileiro, incluindo a parte meridional do Estado do Rio Grande do Norte, o Estado da Paraíba e o Estado de Pernambuco, as bacias hidrográficas litorâneas são drenadas por rios que se tornam perenes apenas após penetrarem os terrenos sedimentares da bacia costeira. Nas partes onde a drenagem se faz sobre os terrenos cristalinos, relativamente impermeáveis, estes rios são intermitentes, não obstante a pluviosidade possa as vezes ser favorável à sua perenização. Na bacia do Rio Gramame, apenas pequena porção dos cursos de água desenvolve-se sobre terrenos cristalinos fazendo com que apenas as cabeceiras dos rios e riachos da parte ocidental da bacia não são perenes.

Nessa ampla região do leste do Nordeste Brasileiro, de Norte a Sul, podem ser resumidas por bacias hidrográficas litorâneas as principais informações hidrológicas decorrentes de estudos para a realização dos planos estaduais de recursos hídricos:

FIGURA 10.3 – LOCALIZAÇÃO DAS BARRAGENS NA BACIA

TABELA 10.5 – CURVAS COTA-ÁREA-VOLUME RECONSTITUÍDAS

O rio Potengi no Rio Grande do Norte que deságua na cidade de Natal drena uma área de 4093 Km². Na área de influência marinha, ocorrem solos e vegetações típicas de mangue, enquanto que na planície fluvial, predominam solos aluviais eutróficos, os quais são intensamente utilizados com agricultura. Ladeando a planície fluvial e estendendo-se para a parte centro-sul da bacia, observam-se relevos tabulares pertencentes aos tabuleiros Costeiros, onde predominam solos podzólicos vermelho-amarelos distróficos, sob vegetação de tabuleiros em grande parte antropizada. A porção central da bacia pertence à Depressão Sertaneja e desenvolve-se sobre embasamento cristalino. Sob uma vegetação de caatinga antropizada predominam solos das classes dos planossolos solódicos, dos brunos não cálcicos e dos solos litólicos. A parte Oeste da bacia faz parte das encostas do Planalto da Borborema, apresentando litologias do cristalino e solos Brunos não cálcicos e litólicos. Nesta bacia hidrográfica, apenas o posto fluviométrico de nome Telha, no município de Trairi, código do DNAEE 38380000, apresenta dados de descarga confiáveis segundo a SERHID (1997), no período de Setembro 1972 a Dezembro de 1985. A área de drenagem deste posto fluviométrico é de 2.582 Km² e é inteiramente localizada na porção da bacia onde os rios são intermitentes. As maiores cotas registradas neste posto são superiores as cotas observadas para as maiores vazões medidas. A precipitação média anual na bacia hidrográfica deste posto fluviométrico é segundo SERHID (1997) de 548 mm.

O rio Pirangi. Com uma área de 458,9 Km², a bacia hidrográfica deste rio está quase integralmente situada dentro da unidade geomorfológica dos tabuleiros costeiros onde ocorrem solos distróficos das classes dos latossolos amarelos, areias quartzosas e podzólicos vermelho-amarelos. Na faixa litorânea encontram-se solos arenos-quartzosos, sob vegetação de mata antropizada e com relevo de dunas fixas. Nesta bacia, não existem dados fluviométricos. A precipitação média anual nesta bacia é de 1138 mm.

O rio Traíri. Com uma área total de 2867,4 Km², a bacia hidrográfica do rio Traíri apresenta mesma configuração geomorfológica que a bacia do rio Potengi. Segundo a SERHID (1997), nesta bacia existem dois postos fluviométricos com dados susceptíveis de aproveitamento: O posto Monte Alegre (384850000) e o posto São José do Mipibu (38490000). O posto Monte Alegre drena uma área de 2.534 Km² e apresentam dados confiáveis de descarga no período de 1977 a 1985. O posto de São José do Mipibu, a jusante do posto de Monte Alegre drena uma área de 2.723 Km² e localiza-se na área litorânea. Possui dados de descarga de 1970 a 1975. A montante do posto fluviométrico de

Monte Alegre, existem dois açudes: o açude Trairi, construído em 1954 com capacidade de armazenamento de 35 milhões de m³ e uma bacia hidrográfica de 1656 Km², e o açude Inharé construído em 1937, com volume de 17,6 milhões de m³ controlando uma área de 232 Km². A precipitação média na área localizada entre o posto de Monte Alegre e o Litoral é, segundo o mesmo estudo de 1032 mm.

O Rio Jacu. O rio Jacu nasce no Estado da Paraíba na região do Seridó e percorre a seguir o Estado do Rio Grande do Norte desaguardo no oceano atlântico na proximidade da cidade de Goianinha. Drena uma área de 2.961 Km², sendo 1.805 Km² no Estado do rio Grande do Norte. Ele apresenta uma configuração geomorfológica similar à bacia hidrográfica do rio Trairi. Nesta bacia, conforme SERHID (1997) existem dois postos fluviométricos: os postos Rio Jacu em São José do Campestre e o posto Rio Jacu em Goianinha, sendo que o primeiro apresenta dados de descarga no período de 1983 a 1990 e para o segundo nenhuma curva-chave pode ser estabelecida. A precipitação média na faixa litorânea da bacia é de 1.192 mm. A montante do posto fluviométrico de São José do Campestre existe o açude Japi II, no rio Jacu, construído em 1965, com volume de 40 milhões de m³, controlando uma área de 1.301 Km².

O Rio Curimataú. O rio Curimataú nasce no Estado da Paraíba na região do mesmo nome e percorre a seguir o Estado do Rio Grande do Norte desaguardo no oceano Atlântico na proximidade da fronteira com o Estado da Paraíba. Drena uma área de 3.140 Km², sendo 830 Km² no Estado do rio Grande do Norte. A configuração geomorfológica desta bacia é similar à da bacia do Rio Jacu, assim como a sua vegetação. A parte litorânea da bacia pertence à região dos tabuleiros costeiros formados por rochas sedimentares da formação Barreiras. Nela se desenvolvem solos das classes dos latossolos amarelos e dos podzólicos vermelho-amarelos, ambos distróficos e sob vegetação de tabuleiros antropizada, principalmente substituída por cana de açúcar. A precipitação média na faixa litorânea desta bacia é de 1.132 mm segundo SERHID (1997). A única estação fluviométrica da bacia do rio Curimataú é a de Pedro Velho localizada no Rio Grande do Norte. No relatório da SERHID, relativo ao Plano Diretor de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte, as informações ali constantes indicam que a série disponível de descarga neste posto corresponde ao período de 1975 a 1985.

O Rio Mamanguape. O rio Mamanguape no Estado da Paraíba nasce na microregião do Agreste da Borborema e deságua no oceano Atlântico no município de Rio Tinto. O rio Mamanguape drena uma área de 3.309 Km², e sua bacia hidrográfica estende-se dos contrafortes do planalto da Borborema até o Litoral. A bacia se situa na depressão

sublitorânea cujas altitudes não ultrapassam os 200 metros. Trata-se de uma região baixa com relevo de suavemente ondulado a ondulado. Os solos da bacia são predominantemente solos das classes Podzólicos vermelho amarelos, brunos não cálcicos e litólicos eutróficos. A área litorânea é formada de rochas sedimentares da formação Barreiras. Na faixa litorânea, a pluviometria média situa-se entre 1000 e 1200 mm (ATECEL, 1994). Na quase integridade do seu curso o rio é intermitente. Nesta bacia existe um único posto fluviométrico, o posto Mulungu (código 38750000) drenando uma área de 1.054,5 km² correspondendo ao alto curso do rio. Este posto foi instalado em 1973 e permanece em atividade atualmente.

O Rio Paraíba. O rio Paraíba esta integralmente inserido no Estado da Paraíba. Ele drena uma área de 20.893 Km² e é do ponto administrativo dividido em quatro bacias: Taperoá, Alto Paraíba; Médio Paraíba e o Baixo Paraíba. O baixo curso do rio torna-se perene na proximidade do litoral. A bacia do Baixo Paraíba possui uma área de contribuição de 2.971 Km², e se estende da região do Brejo Paraibano na proximidade de Natuba até o oceano Atlântico desaguando na cidade de Cabedelo. O relevo da bacia é plano onde predominam áreas de tabuleiro com vales rasos em forma de “U”. Do ponto de vista fisiográfico a parte dessa bacia hidrográfica mais próxima ao oceano é muito semelhante à bacia em estudo. No baixo Paraíba, o posto fluviométrico de Ponte da Batalha (Código 38895000) foi instalado em 12/1969. A série histórica de descargas pode ser considerada ótima até 1988. Depois disto muitas falhas ocorreram e a partir de 1992 frequentemente foram registradas cotas negativas. Na série de dados, são registrados cotas menores do que as encontradas nas campanhas de medição de vazão, ou seja, para determinar as vazões correspondentes a estas cotas, o ramo inferior da curva-chave foi extrapolado.

O Rio Goiana. A bacia hidrográfica do rio Goiana, está localizada na porção oriental norte do Estado de Pernambuco, entre 7° 22' 20" e 7° 54' 47" de latitude sul, e 34° 49' 06" e 35° 41' 43" de longitude a oeste de Greenwich. Está inserida em 77% nas zonas Litoral/Mata e 23% no Agreste, correspondendo às microrregiões da Mata Setentrional Pernambucana e do Médio Capibaribe. A bacia hidrográfica do rio Goiana apresenta uma área de 2.878,3 km². A área da Bacia do Rio Goiana é representada na maior parte por rochas cristalinas e cristalofilianas, que ocupam 2.579,9 km² (89,6%). E por rochas sedimentares, responsáveis por 10,4% da área, nas quais predominam, em superfície, os sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras, de idade Plio-Pleistocênica. Ainda recobre todo o pacote de rochas sedimentares, os aluviões recentes areno-argilosos do Rio Goiana, que, na bacia, ocupam uma área de 120,18 km². Observa-se na bacia a ocorrência de solos

pouco desenvolvidos no norte e a oeste, ficando os solos mais desenvolvidos na parte oriental onde estão presentes Latossolos e Podzolicos. Observa-se ainda a presença de Areias Quartzosas Marinhas Distróficas e solos indiscriminadamente de Mangue no litoral. Quanto à vegetação, ela foi bastante antropizada, a cana de açúcar ocupando 78,7 % da área total da bacia. A precipitação anual média determinada para a bacia é de 1125,9 mm (SRH/PE). Segundo a SRH/PE, (1998), na bacia do rio Goiana existem dois postos fluviométricos cadastrados no Inventário das Estações Fluviométricas (DNAEE,1987), indicados na tabela 10.6. No rio Goiana existe apenas um açude de porte médio, o açude Palmeirinha com capacidade de acumulação de 6,3 milhões de m³ e uma bacia hidrográfica de 90 km².

Tabela 10.6 – Postos fluviométricos na Bacia do Rio Goiana

Código	Posto	Rio	Período
39040000	Nazaré da Mata (Tabocas)	Tracunhaém	1967 - 1984
39080000	Eng. Itapissirica	Tracunhaém	1973 - 1984

O Rio Capibaribe. A bacia do Rio Capibaribe, está localizada na porção norte-oriental do Estado de Pernambuco, entre 7°41' 20" e 8°19'30" de latitude sul, e 34°51'00" e 36°41'58" de longitude oeste. Está inserida nas microrregiões do Recife, da Mata Setentrional Pernambucana (parte sul), de Vitória de Santo Antão, do Médio e Alto Capibaribe e da parte norte do Vale do Ipojuca. O rio Capibaribe nasce nas encostas da Serra de Jacarara a uma altitude aproximada de 1.000 metros no município de Jataúba. Este rio tem origem na Zona do Agreste, a cerca de 200km da Cidade do Recife. O rio Capibaribe apresenta regime fluvial intermitente no seu alto e médio cursos, somente a partir da cidade de Limoeiro, no seu baixo curso, torna-se perene. A bacia do rio Capibaribe foi dividida pela SRH/PE, (1998), em três sub-bacias, a saber: Alto Capibaribe, a montante de Toritama, com área de drenagem igual a 2750 km², Médio Capibaribe, entre Toritama e Limoeiro, com área de drenagem 5650 km² e Baixo Capibaribe, entre Limoeiro e São Lourenço da Mata, com área de drenagem 1230 km², perfazendo um total de 7.557,4 km². A litografia do baixo curso do Capibaribe, na Planície Sedimentar do Recife (área de 99,95km²) é representada superficialmente por sedimentos areno-argilosos recentes, numa mistura de distintos ambientes de delta, de origem fluvio-marinha. No terço inferior da bacia hidrográfica, da foz até a altura da cidade de Carpina, predominam solos desenvolvidos, profundos apropriados para cultivos temporários e perenes. Ocorrem, Latossolos Vermelho Amarelo Eutróficos e Distróficos e

Podzólicos Vermelho Amarelo e Distrófico. A vegetação foi bastante antropizada, ocupando 64,4 % da área total da bacia, sendo deste total 33,8 % de cana. A precipitação anual média determinada para a bacia é de 1095,2 mm (SRH/PE, 1998). Na bacia do rio Capibaribe existem 17 postos fluviométricos cadastrados no Inventário das Estações Fluviométricas (DNAEE, 1987), A SRH/PE selecionou para os estudos do Plano Diretor de Recursos Hídricos apenas três deles: Toritama, Limoeiro e São Lourenço da Mata (tabela 10.7).

Tabela 10.7 – Postos fluviométricos na Bacia do Rio Capibaribe

Código	Posto	Rio	Período
39130000	Toritama	Capibaribe	1966 - 1986
39145000	Limoeiro	Capibaribe	1956 - 1982
39188000	São Lourenço da Mata	Capibaribe	1956 - 1986

Na Bacia do Rio Capibaribe, a montante dos postos fluviométricos existem sete açudes com capacidade superior a 10 milhões de m³ (tabela 10.8).

Tabela 10.8 – Principais açudes da Bacia do Rio Capibaribe

Açude	Município	Área da bacia hidrográfica (km ²)	Capacidade Máxima (m ³)
Carpina	Carpina	5.999,0	270.000.000
Jucazinho	Surubim	4.171,0	240.800.00
Tapacurá	S. Lourenço Mata	360,0	94.200.000
Goitá	Glória de Goitá	450,0	35.380.000
Poço Fundo	Sta. Cruz do Capibaribe	854,0	27.750.000
Varzea do Una	S. Lourenço da Mata	38,0	11.568.010
Eng. G. Pontes / Tabocas	Caruaru	384,0	11.224.714

O Rio Ipojuca. A bacia hidrográfica do rio Ipojuca, localiza-se em sua totalidade no Estado de Pernambuco, entre as latitudes de 8° 09' 50" e 8° 40' 20" de latitude sul, e 34° 57' 52" e 37° 02' 48" de longitude oeste. Devido à sua conformação longitudinal no sentido oeste-leste, esta bacia encontra-se inserida em três microrregiões: do Vale do Ipojuca, de Vitória de Santo Antão e da microrregião do Recife. O rio Ipojuca nasce nas encostas da serra do Pau D'arco, no município de Arcoverde, a uma altitude de, aproximadamente, 900m. Seu percurso, com cerca de 294km, é preponderantemente orientado na direção oeste-leste, sendo seu regime fluvial intermitente, tornando-se perene a partir do seu médio curso, nas proximidades da cidade de Caruaru. Seu estuário foi bastante alterado nos últimos anos em decorrência da instalação do Complexo Portuário de Suape. A bacia

hidrográfica do rio Ipojuca abrange uma área de 3.514,35km². Quase toda a bacia hidrográfica do rio Ipojuca é representada por rochas cristalinas e cristalofilianas do Pré-Cambriano, de vez que 97% da sua área de 3.514,3km² situa-se nesse contexto geológico. Embora esta bacia deságüe no oceano Atlântico, as suas características diferem muito das demais bacias litorâneas da região.

O Rio Sirinhaém. A bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, está localizada entre 8°16'05" e 8°44'50" de latitude sul, e 35°01'00" e 35°47'58" de longitude oeste. Está inserida nas microrregiões da Mata Meridional Pernambucana e do Brejo Pernambucano. O rio Sirinhaém nasce nas encostas da Serra do Alho no município de Camocim de São Félix, a uma altitude aproximada de 800 metros. O rio Sirinhaém ao longo do seu curso, com direção noroeste-sudeste, percorre uma distância de 116km, desaguardo no oceano Atlântico. A bacia hidrográfica do rio Sirinhaém abrange uma área de 2.069,6 km². A bacia do Rio Sirinhaém com apenas 2.069,6km² é dominada - 93% - por rochas cristalinas e cristalofilianas do Pré-Cambriano Indiviso. Os 7% de área sedimentar são cobertos predominantemente por aluviões recentes que ocupam 86,8 km². Esses aluviões recobrem rochas da unidade cretácica. A Formação Cabo, representada por sedimentos conglomeráticos, arcoseanos e siltico-argilosos, além de vulcanitos na forma de sills ou derrames, de composição básica - traquito a basalto. Essas reduzidas ocorrências de representantes da Formação Cabo, constituem a terminação sul da Bacia Sedimentar do Cabo. Embora esta bacia deságüe no oceano Atlântico, as suas características diferem muito das demais bacias litorâneas da região.

O Rio Una. A bacia hidrográfica do rio Una, está localizada no limite sul do litoral do Estado de Pernambuco, entre 8° 17' 14" e 8° 55' 28" de latitude sul, e 35° 07' 48" e 36° 42' 10" de longitude a oeste de Greenwich. Está inserida nas microrregiões do Vale do Ipojuca, Brejo Pernambucano e Mata Meridional Pernambucana. O rio Una nasce na serra da Boa Vista no município de Capoeiras, a uma altitude de aproximadamente 900 metros e percorre uma extensão aproximada de 255km. A direção do seu curso em geral é oeste-leste e apresenta-se intermitente até aproximadamente a cidade de Altinho. A partir daí torna-se perene. A bacia hidrográfica do rio Una apresenta uma área de aproximadamente 6.785,8 km² dos quais 6.292,9 km² estão inseridos no Estado de Pernambuco e os 492,9 km² restantes no Estado de Alagoas. A extensa bacia do rio Una é representada quase inteiramente por rochas cristalinas e cristalofilianas do Pré-Cambriano Indiviso. Com efeito, 97,4% dessa área é constituída pelo Complexo Migmatítico-Granitóide - pCmi. Quanto a área sedimentar com 35,6 km² , correspondente a apenas 2,6% da bacia, é

representada quase inteiramente por depósitos areno-argilosos de aluviões recentes, além de reduzidos testemunhos da Formação Barreiras com composição areno-argilosa, em morros isolados. Embora esta bacia deságüe no oceano Atlântico, as suas características diferem muito das demais bacias litorâneas da região.

Grupo de pequenos rios litorâneos GL1, unidade de planejamento 14 (SRH/PE). A

Unidade de Planejamento Hídrico UP14, que corresponde à bacia hidrográfica do primeiro grupo de pequenos rios litorâneos GL1, estudada pela SRH/PE, (1998), está localizada no litoral norte do Estado de Pernambuco entre 7°35'12" e 8°03'48" de latitude sul, e 34°48'46" e 35°11'33" de longitude oeste. Fica inserida, na sua porção norte, na microrregião da Mata Setentrional Pernambucana, abrangendo ainda toda a microrregião de Itamaracá e parte da microrregião do Recife. A bacia hidrográfica do primeiro grupo de pequenos rios litorâneos é constituída por 7 pequenas bacias da Zona da Mata Norte e rios situados na Região Metropolitana do Recife e que se dispõem de forma paralela e correm no sentido oeste-leste desaguardo no Canal de Santa Cruz ou diretamente no oceano Atlântico. Estes rios são de grande importância para esta região. A bacia hidrográfica do primeiro grupo de pequenos rios litorâneos GL1 apresenta uma área de aproximadamente 1.162,2 km² estando totalmente inserida no Estado. A Unidade de Planejamento UP14, que se estende de Itamaracá até Olinda, na costa do estado, se acha representada predominantemente por sedimentos da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba além de rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano. As rochas cristalinas afloram na porção oeste da área, ao longo de toda a borda da bacia sedimentar e servem de substrato para os sedimentos desta. As rochas cristalinas afloram numa área de 297,3 km² porém o seu limite para a bacia sedimentar acha-se encoberto pelos depósitos da Formação Barreiras, numa área de aproximadamente 200 km². A Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba, de idade Terciária abrange as seguintes unidades litoestratigráficas: Formação Beberibe do Cretáceo Superior, Formação Gramame do Cretáceo Superior e Formação Maria Farinha do Terciário. Recobrindo discordante e indistintamente o cristalino e as formações cretácicas e terciárias, ocorre a Formação Barreiras de idade Plio-Pleistocênica, correspondendo à zona de tabuleiros dissecados por vales estreitos e profundos, e constituindo a principal ocorrência geológica na área em questão. É constituída de areias argilosas e argilas variegadas, de origem continental, exibindo localmente níveis arenosos mais grosseiros, apresentando-se com espessuras muito variáveis. Ocupam uma área de 606,6 km², ou seja, 37,2 % da área da UP. Dentre os solos desenvolvidos na bacia, destacam-se os Latossolos e os Podzólicos, além de

Solos Aluviais, todos agricultáveis. As Areias Quartzosas Marinhas ocupam 35,3 km² de área no contexto da bacia. Os Solos Indiscriminados de Mangue abrangem 366,7 km². O relevo é predominantemente plano. A vegetação bastante antropizada ocupa 77,7 % da área total da UP e a cana representa 65 % deste total. A precipitação anual média determinada para a bacia é de 1772 mm (SRH/PE,1998). Não existe registros fluviométricos para a bacia GL-1. O principal açude da bacia é o açude Botafogo com capacidade máxima de 27,6 milhões de m³ e uma bacia hidrográfica de 88 km².

Grupo de pequenos rios litorâneos GL2, unidade de planejamento 15 (SRH/PE). A

Unidade de Planejamento Hídrico UP15, que corresponde à bacia hidrográfica do segundo grupo de pequenos rios litorâneos GL2, estudada pela SRH/PE, (1998), está localizada no litoral do Estado de Pernambuco entre os paralelos 8°02'42" e 8°25'59" de latitude sul, e 34°52'27" e 35°23'06" de longitude. Fica inserida entre as microrregiões de Vitória de Santo Antão e Recife. Situada na Zona da Mata Sul é formada pelos rios que desembocam no Oceano Atlântico. A bacia hidrográfica do segundo grupo de pequenos rios Litorâneos GL2 (UP15), apresenta uma área de aproximadamente 1.246,3 km², totalmente inserida no Estado de Pernambuco. A maior parte dos 1.246,3 km² desta Unidade de Planejamento é representada por rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano, desde que 76,6 % pertencem a esse domínio lito-estratigráfico. Os sedimentos são representados pela Bacia Sedimentar do Cabo que ocorre exclusivamente na bacia homônima e imediatamente ao sul do Lineamento Pernambuco, sendo seus afloramentos mais setentrionais conhecidos na periferia da cidade do Recife, ocorrendo, pois, em sub-superfície em extensa profundidade, como verificado em recente perfuração de um poço pela CPRM (referência nº 9-JG-1-PE), com apoio da PETROBRÁS, na praia de Piedade que atingiu a profundidade de 1.100m sem encontrar o embasamento cristalino (SRH/PE, 1998). Nesse grupo de bacias, ocorrem vários solos desenvolvidos com destaque para os Latossolos e os Podzólicos. São solos apropriados para a agricultura, com elevada capacidade de retenção hídrica e aproveitamento das chuvas. As fases de relevo mais movimentadas são capazes de gerar escoamentos mais representativos e até erosão nos talwegues. Os Latossolos se estendem por 561,4 km², enquanto que os Podzólicos ocupam 142,0 km². As Areias Quartzosas Marinhas Distroficas ocorrem em 13,9 km². Os Solos Indiscriminados de Mangue se estendem por uma área de 57,2 km². O relevo varia de ondulado à fortemente ondulado. A vegetação bastante antropizada ocupa 66 % da área total da UP e a cana representa 96 % deste total. A precipitação anual média determinada para a bacia é de 1561 mm (SRH/PE,1998). Não

existe registros fluviométricos para a bacia GL-2 e apenas dois açudes possuem capacidade máxima superior a 10 milhões de m³, o açude Duas Unas com 24,2 milhões de m³ e o açude Utinga com 10,3 milhões de m³.

10.2 – Estudos hidrológicos

10.2.1 – Análise de consistência dos dados fluviométricos

10.2.1.1 – Metodologia

Foram digitadas e gravados em arquivo os níveis médios diários nos rios Gramame, Mamuaba e Mumbaba, medidos em suas respectivas estações limnimétricas. Os períodos foram indicados anteriormente na tabela 10.2. Os níveis médios foram conferidos diretamente das fichas dos observadores. Erros grosseiros foram corrigidos, assim como dados de fichas com a indicação errada do mês de observação. As observações efetuadas no ano de 1982 no posto do rio Gramame são duvidosas (arquivo “Níveis DiáriosEstaçõesLimnimétricas.xls”).

As vazões diárias correspondentes aos níveis medidos nas seções de medição nos três rios: Gramame, Mamuaba e Mumbaba não puderam ser calculadas, pois não há disponibilidade de curvas-chave para estas seções.

Da mesma forma, foram gravados em arquivos, os dados mensais de níveis e vazões nas estações fluviométricas dos rios Gramame, Mumbaba e Mamuaba. Os valores indicados no arquivo “NíveisMensais.xls” correspondem aos valores máximo, médio e mínimo mensais.

As vazões diárias no posto fluviométrico do rio Mamuaba, de Janeiro de 1972 a Dezembro de 1974, foram digitadas no arquivo “VazõesDiáriasDiniz.xls” a partir das informações encontradas em Diniz (1994).

No arquivo “SériesMensaisdeVazões.xls” foram agrupadas as vazões calculadas a partir das lâminas apresentadas pela TECNOSAN, no período de Janeiro de 1972 a Janeiro de 1975, com as vazões médias mensais das fichas da CAGEPA.

Assim, os dados médios mensais disponíveis, compilados no arquivo “SériesMensaisdeVazões.xls”, são:

- Na seção transversal correspondendo ao posto limnimétrico no rio Mumbaba, dados no período de Janeiro de 1972 a Abril 1982.
- Na seção transversal correspondendo ao posto limnimétrico no rio Mamuaba, dados no período de Janeiro 1972 a Abril 1982.
- Na seção transversal correspondendo ao posto limnimétrico no rio Gramame, dados no período de Janeiro 1972 a Agosto 1978.

A análise de consistência dos dados mensais foi feita, adotando-se a seguinte metodologia: Cálculo de regressão linear simples e múltipla entre dados de vazão e dados de precipitação do mês e do mês anterior; análise visual dos hidrogramas e cálculo do rendimento anual das sub-bacias relativas aos postos de observações limnimétricas.

10.2.1.2 – Resultados

10.2.1.2.1 - Regressão linear simples e múltipla entre vazão e precipitação.

Calculou-se o coeficiente de determinação R^2 , da regressão linear simples entre dados mensais de vazão e a precipitação média mensal do mesmo mês (calculada pelo polígono de Thiessen, na sub-bacia do posto fluviométrico), assim como o coeficiente de determinação R^2 , da regressão linear múltipla entre dados de vazão e dados de precipitação do mesmo mês e do mês anterior. Os resultados aparecem na tabela 10.9.

Tabela 10.9 – Coeficiente de determinação R^2 , das regressões lineares

Sub-Bacia	Regressão linear simples $Q(i) = a + b P(i)$	Regressão linear múltipla $Q(i) = a + bP(i) + cP(i - 1)$
Mumbaba	0,600	0,616
Mamuaba	0,547	0,666
Gramame	0,359	0,375

Embora não se deva esperar altos valores de correlações neste tipo de estudo, os resultados relativamente baixos dos coeficientes de determinação para o rio Gramame, quando comparados com os rios Mumbaba e Mamuaba indicam que erros devem permanecer nos dados, os quais tentar-se-á corrigir pela observação visual dos hidrogramas mensais.

10.2.1.2.2 - Análise dos hidrogramas mensais

Os hidrogramas mensais foram traçados nas figuras 10.4 a 10.6, com os dados de vazão no eixo inferior e os dados de precipitação no eixo horizontal superior a fim de detectar eventuais erros. Os erros são detectados quando ocorrem incompatibilidades entre os valores de precipitação e os valores de vazões observados. Nas figuras 10.4 a 10.6, os erros detectados foram assinalados por uma seta. Nas tabelas 10.10 a 10.12, onde foram registrados os valores de vazões médios mensais para cada posto fluviométrico, os valores duvidosos são marcados com o símbolo “>”, se a vazão provavelmente correta deve lhe ser superior e com o símbolo “<”, no caso contrário. Valores potencialmente errados, sem saber no entanto se é para mais ou para menos são marcados com *.

FIGURA 10.4 – HIDROGRAMA DO RIO MUMBABA (1972/1982)

FIGURA 10.5 – HIDROGRAMA DO RIO MAMUABA (1972/1982)

FIGURA 10.6 – HIDROGRAMA DO RIO GRAMAME (1972/1978)

TABELA 10.10 – VAZÕES MÉDIAS MENSAIS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DO RIO MUMBABA

TABELA 10.11 – VAZÕES MÉDIAS MENSAIS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DO RIO MAMUABA

TABELA 10.12 – VAZÕES MÉDIAS MENSAIS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DO RIO
GRAMAME

No caso do rio Gramame, observa-se um comportamento diferente dos hidrogramas nos períodos de 1972 a 1974 e de 1975 a 1979, as vazões mínimas neste último período sendo praticamente nulas. Em Agosto de 1974, iniciou-se o funcionamento da indústria alcooleira Giasa, com uma captação de água no rio logo a montante do posto fluviométrico, retirando uma vazão de 600 m³/h para a usina. Modificações na estação elevatória foram feitas em Agosto de 1986, passando a vazão captada para 900 m³/h. Essa captação abastece a usina da GIASA, volumes adicionais são captados de maneira difusa, ao fio d'água nos rios Gramame (desde Agosto de 1974) e Mamuaba (Provavelmente a partir de 1978) para a irrigação complementar da cana de açúcar, isto é, funcionando logo após o período chuvoso, geralmente de Setembro a Janeiro, sendo também acompanhada de irrigação com vinhoto. Não há informação sobre lâminas utilizadas, nem turno de rega. Isto pode explicar parcialmente porque o coeficiente de determinação deu valores baixos no rio Gramame no período total de observações. No caso do rio Mamuaba, os valores observados de vazão são modificadas pela irrigação da GIASA a partir de 1978.

10.2.1.2.3 - Análise do rendimento

Os rendimentos das sub-bacias correspondentes aos postos de observações limnimétricas foram calculados anualmente. Os valores aparecem nas tabelas 10.13 a 10.15. Na tabela 10.16, os valores médios de rendimento foram calculados para os períodos 1972 – 1974; 1975 – 1977 e total. Os resultados revelam que os dados observados no posto fluviométrico de Gramame não podem ser utilizados a partir de 1975 e que os rendimentos tanto no posto do rio Mumbaba como no posto do rio Mamuaba são muito mais alto no período 1972 – 1974 do que no período 1975 – 1977.

Tabela 10.16 – Rendimentos observados nos períodos 1972 – 1974; 1975 – 1977 e total.

Posto Fluviométrico	Período	Rendimento (%)	Precipitação (mm)
Mumbaba	1972 – 1974	0,33	1514,09
	1975 – 1977	0,27	1406,50
	1972 - 1983	0,25	1411,76
Mamuaba	1972 – 1974	0,31	1680,34
	1975 – 1978	0,24	1460,81
	1972 - 1983	0,28	1537,78
Gramame	1972 – 1974	0,40	1621,50
	1975 – 1977	0,13	1441,72
	1972 - 1979	0,24	1507,34

TABELAS 10.13, 10.14 E 10.15 – RENDIMENTO DA BACIA DOS POSTO
FLUVIOMÉTICO DO RIO MUMBABA, MAMUABA E GRAMAME,
RESPECTIVAMENTE

Desta análise de consistência, deduz-se que, para os estudos hidrológicos efetuado neste item, deverá ser considerado o período de 1972 a 1977 como confiável, descartando-se o posto fluviométrico do rio Gramame.

10.2.2 – Análise estatística dos dados fluviométricos.

A partir dos dados mensais das vazões observadas nos postos fluviométricos, calculou-se os seguintes valores estatísticos: a média, o coeficiente de variação, o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose, assim como os valores mínimos e máximos. Os resultados são apresentados nas tabelas 10.17 e 10.18. Observa-se destas tabelas que as maiores médias ocorrem no mês de Junho e que o coeficiente de assimetria é positivo, o que indica uma maior frequência de vazões abaixo da média.

Devido a pequena amostra de dados não há possibilidade de realizar outros estudos estatísticos.

10.2.3 – Regionalização dos dados fluviométricos.

10.2.3.1 – Metodologia

A dificuldade de obtenção de dados para os estudos em hidrologia e recursos hídricos, levaram o hidrólogo a buscar formas de transferências de informações de um local para outro na bacia ou, no caso de pequenas bacias hidrográficas de uma bacia para outra desde que apresentem semelhanças do ponto de vista hidrológico. Trata-se da regionalização. A vazão máxima anual esta ligada a um determinado risco e pode ser obtida por uma distribuição de probabilidades. A vazão média de longo período permite caracterizar a capacidade de disponibilidade de uma determinada bacia. A ela é associada o conceito de risco, ou seja constitui um parâmetro de uma função de distribuição. A curva de probabilidade de vazões mínimas permite a estimativa do risco de que ocorram vazões menores que um valor escolhido. A regionalização das vazões máxima, média e mínima, assim como da curva de permanência segue a técnica de regionalização de curvas de probabilidade de vazões descrita em Tucci (1993). As fases da regionalização podem ser expressas da seguinte maneira:

- a)- Seleção e análise dos dados básicos
- b)- Determinação da curva adimensional de probabilidade para os postos selecionados e definição da curva regional
- c)- Estabelecimento da regressão da vazão de adimensionalização com variáveis físicas e climáticas das bacias ou sub-bacias selecionadas.

TABELA 10.17 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE VAZÃO DO POSTO
FLUVIOMÉTRICO DO RIO MUMBABA
E TABELA 10.18 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE VAZÃO DO
POSTO FLUVIOMÉTRICO DO RIO MAMUABA

d)- Verificação da necessidade de subdivisão em sub-regiões de comportamento hidrologicamente homogêneo.

e)- Mapeamento das vazões específicas

Os dados fluviométricos para a regionalização devem ser analisados quanto ao período disponível, - séries de 5 anos no mínimo são necessárias desde que haja na amostra postos com séries longas; quanto a qualidade da curva-chave, - postos para os quais as vazões mínima ou máxima foram obtidas a partir da extrapolação da curva-chave não devem ser utilizados; quanto a independência das vazões e quanto a estacionaridade das séries. Basicamente no que concerne esses dois últimos critérios, a estacionaridade e a independência das vazões são afetadas de modo a impedir a sua utilização para estudo de regionalização quando, entre outros, reservatórios ou obras civis foram construídos a montante do posto fluviométrico modificando o regime hídrico. Seleciona-se então um período comum de observações para todos os postos, identificado como período base para a regionalização. Este período pode diferir para as vazões máxima, mínima e média, sendo que para esta última deve ser superior a trinta anos para ter uma representatividade estatística.

A definição de uma região homogênea está relacionada com um determinado tipo de comportamento do sistema hídrico. Na regionalização hidrológica, a homogeneidade é entendida como a semelhança na resposta das funções regionais obtidas, que neste caso são a curva adimensional de probabilidade e a equação de regressão. Segundo NERC (1975) citado por Tucci (1993), a similaridade das características geográficas das regiões permite definir preliminarmente as sub-regiões. No caso deste estudo, pertencem evidentemente a regiões homogêneas diferentes, postos cuja área de contribuição desenvolve-se sobre solos cristalinos, pelo fato dos rios serem intermitentes e postos que drenam áreas de regiões sedimentares.

10.2.3.2 – Resultados

Utilizando todas as informações compiladas no item 10.1.2 deste capítulo, classificou-se, na tabela 10.19, as bacias hidrográficas descritas segundo as principais características do ponto de vista da regionalização. No que diz respeito à representatividade regional, atribuí-se a classe 1 quando a bacia hidrográfica estende-se em grande parte sobre uma província geológica sedimentar como é o caso da bacia hidrográfica do rio Gramame; a classe 2, quando menos de 30% da área da bacia se estende sobre uma província geológica sedimentar e a classe 3 quando toda a área da bacia difere da bacia hidrográfica do rio Gramame. Observa-se nesta tabela, que das bacias classificadas na classe 1, apenas a bacia hidrográfica do rio Gramame apresenta dados fluviométricos. Porém esta bacia hidrográfica é muito pequena

TABELA 10.19 – RESUMO DA ANÁLISE REGIONAL

para efetuar dentro da mesma um estudo de regionalização. Assim, constata-se que o estudo de regionalização é inviável face a escassez de informações.

10.2.4 – Geração sintética de séries pseudo-históricas de vazão utilizando um modelo chuva-vazão.

10.2.4.1 - Metodologia

Neste trabalho, utiliza-se o modelo distribuído conceptual AÇUMOD (Paiva et al., 1999; Silans et al., 2000), descrito abaixo. Modelos chuva-vazão precisam ser calibrados e validados sobre períodos ou dados fluviométricos distintos. É importante estabelecer critérios ou indicadores para julgar da qualidade da calibração e da validação. O simples critério do coeficiente de correlação freqüentemente utilizado não é suficiente. Neste trabalho, o julgamento da qualidade das fases de calibração e validação, além de observações visuais dos hidrogramas será feito considerando certos indicadores descritos a seguir:

- Média: São comparadas as médias aritméticas das vazões calculadas e observadas.
- Desvio-padrão: São comparados os desvios padrão sobre os valores calculados e observados.
- Máximo e Mínimo: São comparados os valores máximos e mínimos mensais das séries de vazões geradas e calculadas.
- Rendimento: Os rendimentos da bacia são calculados considerando as vazões geradas e observadas.
- RMSE: É o erro quadrático médio. Quanto menor for este valor, menor é a distância média entre valores observados e calculados
- Correlação: Trata-se do valor de correlação entre valores observados e calculados. Deve ser o mais próximo possível da unidade.
- Pbias: representa o valor médio dos resíduos. O seu valor deve ser o menor possível. Valores negativos indicam uma sub-estimação dos valores calculados, o contrário ocorrendo para valores positivos.

10.2.4.1.1 - Descrição do AÇUMOD

O AÇUMOD é um modelo hidrológico distribuído que efetua o balanço hídrico dos açudes implantados na rede de drenagem da bacia hidrográfica, considerando as respectivas regras de operação dos mesmos. É uma adaptação do modelo SIMMQE (DNAEE, 1983) desenvolvido pela ORSTOM e utilizado pelo DNAEE na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba. O AÇUMOD guarda a mesma estrutura que o SIMMQE, tendo simplificado e adaptado ao

microcomputador os seus comandos de leituras, entradas de dados e saídas. Além disto, algumas modificações foram introduzidas para torná-lo mais adaptado às regiões semi-áridas.

Neste modelo, o espaço geográfico da bacia hidrográfica é discretizado em uma malha retangular formada por quadrículas quadradas embutidas. Em cada quadrícula, o ciclo hidrológico é representado por um modelo hidrológico conceitual. Em cada quadrícula são indicados parâmetros descritivos do ciclo hidrológico, assim como atributos para representar o sentido da drenagem e a possível existência de elementos da arquitetura hidráulica da bacia hidrográfica.

A discretização básica é formada de quadriculas-mãe de lado a , numeradas seqüencialmente. Cada quadrícula pode ser subdividida em quadrículas menores de lado $a/2$, $a/4$, $a/8$, conforme mostrado na figura 7. Uma quadrícula de lado $a/2^n$ ($n = 0, 1, 2$ ou 3) só pode ter como quadrícula vizinha uma quadrícula de mesmo tamanho, $a/2^n$, ou de tamanho imediatamente inferior, $a/2^{n+1}$, ou imediatamente superior $a/2^{n-1}$.

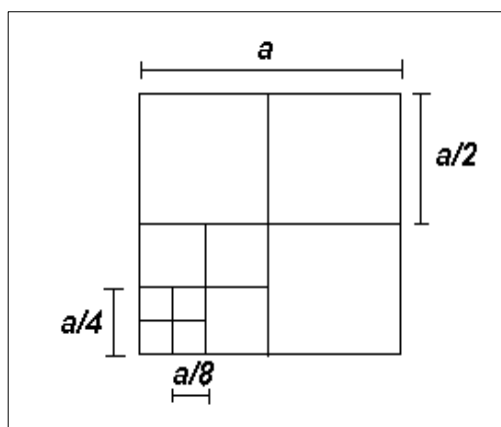


Figura 7 – Discretização

A cada quadrícula são atribuídos certos parâmetros:

Altitude mínima - é obtida a partir da observação das cartas topográficas.

Sentido de drenagem - São 8 alternativas para o sentido de drenagem conforme mostrado na figura 8, sendo que uma quadrícula obrigatoriamente drena para outra na qual a altitude mínima é inferior. À quadrícula que corresponde ao exutório da bacia é atribuído o sentido genérico "Ex" de exutório.

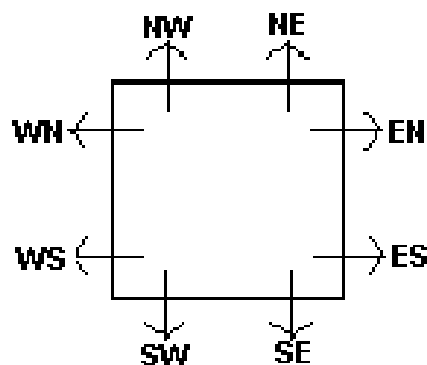


Figura 8 – Sentido de Drenagem

Rio - São consideradas quadrículas "Rio", aquelas que fazem diretamente a ligação entre um elemento da estrutura hidráulica e outro. Às outras quadrículas não é atribuído este atributo.

Zonas hidrológicas homogêneas - Observando as cartas do solo, da vegetação (ou ocupação do solo), da geologia e eventualmente da topografia, desenha-se na bacia hidrográfica, zonas hidrológicas homogêneas (figura 9). São zonas para as quais, à uma mesma chuva e mesma umidade inicial do solo, corresponde uma idêntica resposta hidrológica, ou seja, apresentam mesma função de produção de água. Superpondo com um Sistema de Informações Geográficas o mapa das zonas hidrológicas homogêneas e o mapa da bacia discretizada (figura 9), atribui-se a cada quadrícula a percentagem de área de cada zona hidrológica homogênea nela contida.

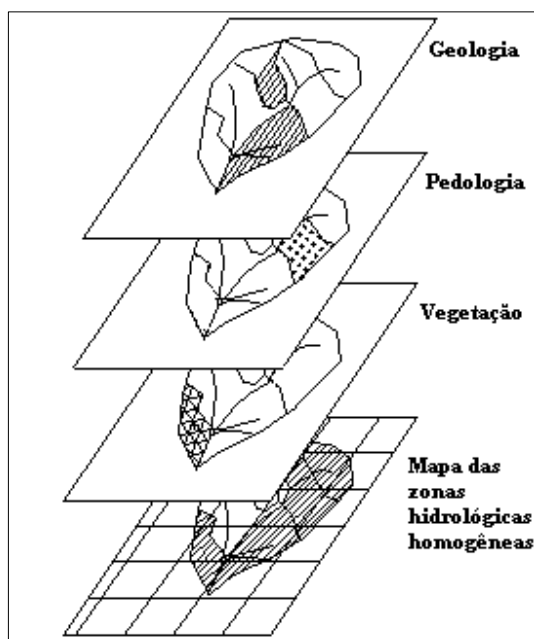


Figura 9 - Traçado das zonas hidrológicas homogêneas

Elementos da arquitetura hidráulica - A cada quadrícula pode ser atribuído no máximo um elemento da estrutura hidráulica. São considerados elementos da estrutura hidráulica os barramentos (açudes); as captações de água no rio; o local de recepção eventual de transposição de vazões de outras bacias hidrográficas; os postos fluviométricos e outros pontos onde se requer informações do modelo tais como ponto de futuros barramentos ou exutórios de sub-bacias.

Os açudes são classificados como sendo de ordem 1 ou 2. Os açudes de ordem 1 são os açudes pequenos em geral, nos quais não há retirada de água significativa e que não tem outro açude a montante. Os açudes de ordem 2 são aqueles que não entram nessa categoria. Para efetuar o balanço hídrico no açude a cada passo de tempo do modelo, é necessário entrar a curva cota - área - volume do açude, assim como as cotas do vertedouro e a cota do porão. Além do mais, pode existir o caso onde o açude foi construído ou modificado durante o período da simulação, devendo-se informar a data da construção ou das eventuais modificações assim como as novas curvas cota - área - volume correspondentes.

No modelo, os pontos de captação ao longo do rio, assim como os pontos de transferências, os postos fluviométricos e os demais pontos da estrutura hidráulica são considerados como açudes de ordem 2, porém com uma curva cota-área-volume nula, ou seja com um único ponto $[0, 0, 0]$.

Zonas pluviométricas - Define-se as zonas pluviométricas sobre a bacia hidrográfica através do polígono de Thiessen. A cada quadrícula é então associado o posto pluviométrico o mais próximo.

O conjunto das operações discretização e implantação da estrutura hídrica permite a formação de um banco de dados.

MODELIZAÇÃO MATEMÁTICA DO CÍCLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico é simulado na bacia hidrográfica através de três funções:

- função de produção de água
- função de transferência de água
- função balanço hídrico nos açudes.

As variáveis de entrada do modelo são os valores de precipitação diária em cada posto pluviométrico utilizado para a definição das zonas pluviométricas e os valores de

evapotranspiração potencial nestes mesmos pontos. Hargreaves (SUDENE, 1984) tem estimado o valor de evapotranspiração potencial média diária mensal para a região Nordeste para a maioria dos municípios onde existem postos pluviométricos. A evapotranspiração potencial pode também ser calculada pela fórmula de Penman desde que dados estejam disponíveis, ou a partir de medições do tanque classe "A" efetuando a devida repartição espacial e multiplicando os valores observados pelo coeficiente de tanque.

A função produção de água

A finalidade desta função é repartir as precipitações entre infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração, armazenamento no solo e percolação profunda. A função efetua o cálculo das lâminas de água em duas etapas.

Na primeira etapa, calcula-se em mm a quantidade de água disponível para gerar os escoamentos. Este cálculo é feito efetuando o balanço hídrico em um reservatório fictício, o reservatório solo, conforme mostrado na figura 10. Para ser adaptado às regiões semi-áridas onde os solos, geralmente cobertos por vegetação esparsa apresentam uma crosta superficial (Montenegro, 1990), um termo de escoamento superficial direto, Q_{sur} , foi introduzido. Ele permite a geração de escoamento superficial, mesmo se a intensidade da precipitação for inferior à capacidade de infiltração e o solo não estiver saturado (Goula Bi Tie, 1993):

$$Q_{sur} = 0 \quad \text{se } P_m \leq ETP \quad (1)$$

$$Q_{sur} = (P_m - ETP) \cdot K_{rs} \quad \text{se } P_m > ETP \quad (2)$$

$$K_{rs} = \text{Min}\left(\frac{R + P_m}{R_{max}}, C_{rs}\right) \quad (3)$$

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

A precipitação efetiva é então:

$$P = P_m - Q_{sur} \quad (4)$$

e a quantidade de água disponível para gerar os escoamentos, $Agua$, em mm é dada por:

$$Agua = \text{Max}(R + P - R_{max}, 0) + \frac{Dr(2R_{BA} + Dr)}{4(C_{rt} - D_{crt})} \quad (5)$$

onde:

- . R é a reserva de água no solo expressa em mm.
- . R_{max} é a reserva máxima de água no solo, acima da qual nenhuma água é retida no solo.
- . Dr é a variação da quantidade de água no solo em mm durante o dia:

$$Dr = \text{Max}(R_{HA} - R_{BA}, 0) \quad (6)$$

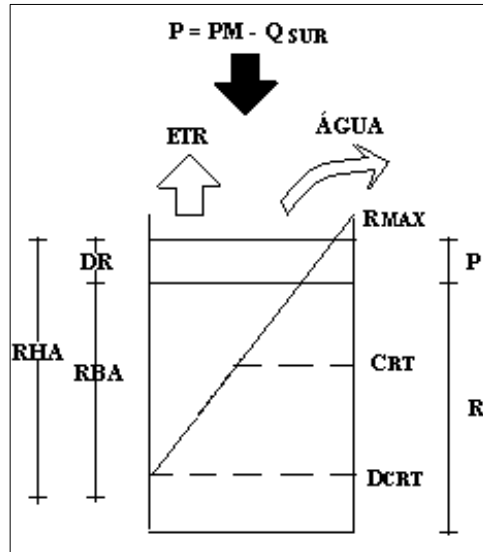


Figura 10 - Descrição da função produção de água

. R_{BA} e R_{HA} correspondem às reservas útil em água antes e depois da precipitação respectivamente:

$$R_{BA} = \text{Max}(R, Dcrt) - Dcrt \quad (7)$$

$$R_{HA} = \text{Min}[\text{Max}(R + P, Dcrt), Rmax] - Dcrt \quad (8)$$

. Crt é o nível correspondente à capacidade média de armazenamento de água no solo, em mm.

$$Crt = \frac{Rmax - Dcrt}{2} + Dcrt \quad (9)$$

. $Dcrt$ é a capacidade de armazenamento de água no solo, em mm, abaixo da qual não há escoamento.

A evapotranspiração real é então calculada pela expressão:

$$ETR = \text{Min}(R + P - \text{Agua}, ETP) \quad (10)$$

e a reserva de água no solo no passo de tempo seguinte, R_{j+1} é dada por:

$$R_{j+1} = R_j + P - \text{Agua} - ETR \quad (11)$$

Na Segunda etapa, a quantidade de água disponível para os escoamentos, Agua , é repartida entre escoamento superficial e escoamento de base. Um primeiro reservatório utilizando uma função de infiltração FN separa a quantidade Agua em escoamento superficial QR e escoamento infiltrado QI :

$$QI = \text{Min}(\text{Água}, FN) \quad (12)$$

$$QR = \text{Max}(\text{Água} - Qi, 0) \quad (13)$$

A seguir, dois outros reservatórios geram componentes retardadas para o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo respectivamente.

Para o escoamento superficial, a soma dos termos QR e Qsur é dividida em duas componentes QRR1 e QRR2 cuja soma forma o escoamento superficial QRR:

$$QRR = QRR1 + QRR2 \quad (14)$$

QRR1 é a componente instantânea enquanto QRR2 representa o escoamento subsuperficial retardado em função do nível RR no reservatório conforme a figura 11:

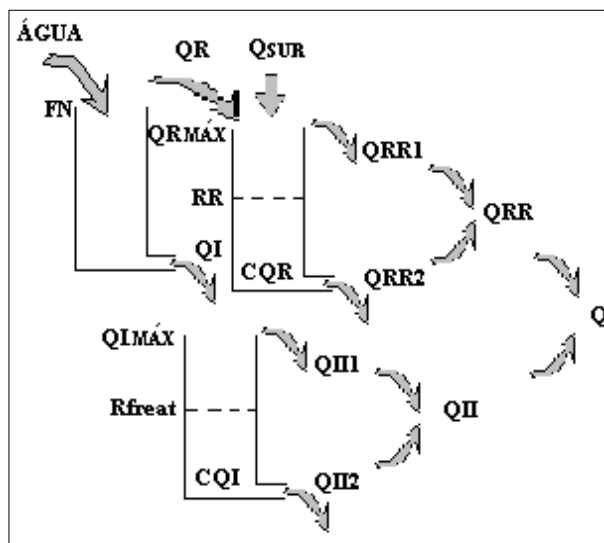


Figura 11 - Repartição da quantidade Água em escoamento superficial e escoamento de base.

Tem-se:

$$RR_{j+1/2} = RR_j + QR + Q_{sur} \quad (15)$$

$$QRR2 = CQR \cdot RR_{j+1/2} \quad (16)$$

$$QRR1 = \text{Max}(RR_{j+1/2} - QRR2 - QR_{max}, 0) \quad (17)$$

$$RR_{j+1} = RR_{j+1/2} - QRR2 - QRR1 \quad (18)$$

onde RR_j , $RR_{j+1/2}$ e RR_{j+1} representam os níveis de água neste reservatório no tempo inicial, em um tempo intermediário durante o processo de escoamento e no passo de tempo seguinte respectivamente.

Para o escoamento de base, o processo de cálculo é idêntico. O escoamento de base QI é dividido em duas componentes QII1 e QII2 (figura 11):

$$QII = QII1 + QII2 \quad (19)$$

$$R_{freat\ j+1/2} = R_{freat\ j} + QI \quad (20)$$

$$QII2 = CQI \cdot R_{freat\ j+1/2} \quad (21)$$

$$QIII1 = \text{Max}(R_{freat\ j+1/2} - QII2 - Q_{Imax}) \quad (22)$$

$$R_{freat\ j+1} = R_{freat\ j+1/2} - QIII1 - QII2 \quad (23)$$

onde $R_{freat\ j}$, $R_{freat\ j+1/2}$ e $R_{freat\ j+1}$ representam os níveis de água no reservatório subterrâneo no tempo inicial, em um tempo intermediário e no passo de tempo seguinte.

A lâmina escoada para uma unidade hidrológica homogênea dentro de uma zona de precipitação (ou produção de água) é então dada pela expressão:

$$Q = QRR + QII \quad (24)$$

A função de transferência da água

A transferência dos volumes escoados para as quadrículas "Rio" é efetuada pelo método das isócronas. As zonas isócronas são definidas a partir do tempo de concentração da bacia hidrográfica expresso em dias e fração de dia. O número de zonas isócronas, NZC, é igual ao tempo de concentração arredondado ao inteiro superior. Por exemplo, uma bacia hidrográfica com um tempo de concentração estimado em 3,2 dias, terá quatro zonas isócronas ($NZC = 4$), como pode se ver na figura 12. O método da definição das zonas isócronas, inicia-se pelo cálculo do tempo de transferência (TRF) de uma quadrícula, i , para a quadrícula, $i+1$, situada imediatamente a jusante. Este tempo é inversamente proporcional à raiz quadrada da declividade:

$$TRF_{i,i+1} = K \cdot d_i / \sqrt{(Z_i - Z_{i+1}) / d_i} \quad (25)$$

onde:

d_i é a distância dos centros geométricos das quadrículas i e $i+1$;

Z_i e Z_{i+1} são respectivamente as altitudes das quadrículas i e $i+1$;

K é um coeficiente de proporcionalidade a ser determinado.

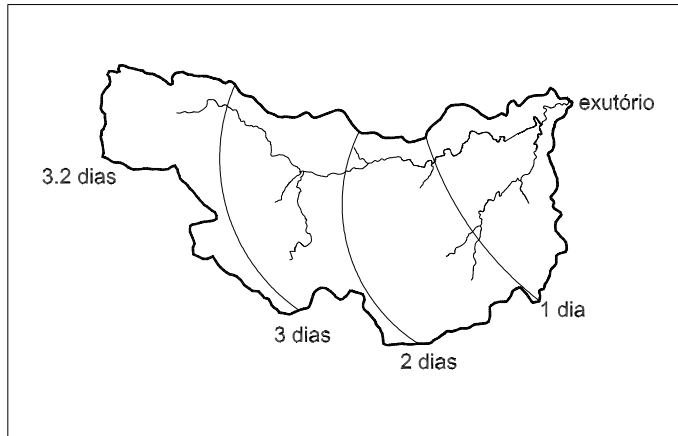


Figura 12 – Zonas Isócronas

O tempo de concentração T_c da bacia é igual ao tempo em que a chuva, que cai no ponto mais distante do exutório da bacia hidrográfica, leva para atingi-lo (Villela e Mattos, 1975). Neste caso, tem-se:

$$T_c = \text{Max} \left[\sum_{i,i+1=1}^n \text{TRF}_{i,i+1} \right] \quad (26)$$

$$= K. \text{Max} \left[\sum_{i,i+1=1}^n d_i / \sqrt{(Z_i - Z_{i+1}) / d_i} \right]$$

onde n corresponde ao número de quadrículas percorridas pela água a partir de uma quadrícula i até o exutório. O coeficiente K pode então ser calculado pela equação 26.

A cada quadrícula é associado o número da zona isócrona à qual pertence, N_{zi} , pela equação:

$$N_{zi} = \text{INT} \left[\frac{K. \sum_{i,i+1=1}^n \left[d_i / \sqrt{(Z_i - Z_{i+1}) / d_i} \right]}{T_c} \cdot \text{NZC} \right] \quad (27)$$

onde INT representa a parte inteira da expressão entre [].

O volume Q_i^j disponível em uma quadrícula "Rio", i , a cada passo de tempo, j , é calculado pela expressão:

$$Q_i^j = \sum_{K=1}^n QD_K^{j-K+1} \quad (28)$$

onde QD_K^{j-K+1} representa 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 estabelecidos a partir do produto das lâminas de água escoadas Q (equação 24) pela área da zona hidrológica homogênea associada, contida na zona isócrona K , no passo de tempo $J-K+1$.

A função balanço hídrico nos açudes

Em cada açude da bacia hidrográfica é efetuado um balanço hídrico, considerando os volumes de entrada na quadrícula onde se encontra o açude, os volumes precipitados sobre a superfície do açude, as contribuições sobre a área da bacia hidráulica descoberta, as perdas por evaporação, os volumes retirados nos açudes para abastecimento, os volumes restituídos na rede hidrográfica a jusante do açude (volumes ecológicos ou de operação dos reservatórios) e os volumes eventualmente vertidos pelo sangradouro. Os volumes de entrada na quadrícula do reservatório são constituídos pela soma dos volumes Q_i^j na rede hidrográfica entre o açude considerado e os açudes imediatamente a montante, acrescida dos volumes vertidos pelos sangradores desses açudes e dos volumes restituídos a jusante dos mesmos respeitando-se o tempo de percurso desses volumes em função das zonas isócronas. No caso dos açudes de ordem 1, não existe contribuição de açudes a montante nem retirada de água. São açudes de cabeceiras dos rios, os quais são simulados em primeiro lugar. O balanço hídrico de todos os açudes é efetuado a cada dia, de montante para jusante. Foi introduzido no modelo a possibilidade de armazenamento de volumes de água importantes em planícies de inundação ou depressões para os quais uma perda por evaporação é considerada. Foi também acrescentada a possibilidade de uma perda constante ao longo da rede de drenagem para tomar conta de abstrações eventuais pelos depósitos aluvionares no leito dos rios.

10.2.4.1.2 – Aplicação do AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio Gramame

Os dados de entrada do modelo hidrológico AÇUMOD são os dados diários de precipitação e os dados mensais de evapotranspiração potencial. Os aspectos climatológicos gerais sobre a bacia hidrográfica foram descritos no capítulo 4, no qual também apresentou-se todos os dados climatológicos disponíveis. Os dados de precipitação na bacia hidrográfica foram consistidos no período comum de observações, qual seja de 1972 a 1989, para onze postos administrados pela CAGEPA, assim como para os postos de També, Acaú e Sapé.

Foram também considerados os dados do posto da GIASA no período 1972-1988. Os postos de També, Sapé, Alhandra e Acaú possuem observações sobre períodos maiores.

Para o uso do modelo chuva-vazão AÇUMOD, um banco de dados de precipitação consistidos no período de 1972 a 1988, foi construído pelo próprio modelo com arquivos distintos para os dados diários e mensais. Os postos utilizados são indicados na tabela 10.20.

Tabela 10.20 – Postos Pluviométricos utilizados para o cálculo da precipitação média no AÇUMOD

Código	Latitude	Longitude	Altitude	Nome
1735132	9.194,388	268,144	136,00	Faz. Mamaba de Cima
1734025	9.198,117	277,332	71,00	Faz. Mamuaba
1734026	9.205,515	282,823	89,00	Faz. Mumbaba
1735133	9.183,317	266,355	139,00	Faz. Santa Emilia
1734029	9.207,390	290,180	55,00	Faz. Veneza
1735136	9.196,257	273,659	101,00	Imbiribeira
1735127	9.188,865	270,011	125,00	Jangada
1734031	9.212,928	291,999	44,00	R-2Centro
1734032	9.211,084	292,006	61,00	R-5CruzdasArmas
1734030	9.214,793	297,509	24,00	R-9Tambau
1735135	9.190,734	275,524	110,00	Riacho do Salto
3849254	9.214,599	253,309	125,00	Sapé
3849878	9.179,630	266,373	190,00	També
1730000	9.186,380	276,100	55,00	Giasa
3849232	9.192,520	262,630	146,00	Acaú

Quanto a evapotranspiração potencial sobre a bacia hidrográfica, os valores médios calculados pelo método de Hargreaves (tabela 4.5, capítulo 4) revelam ser pequena a variabilidade espacial da mesma. No posto de Marés, onde a evaporação do tanque classe “A” é medida, dados foram registrados nos anos 1972 a 1983. Como a variação interanual é pequena, usou-se para o modelo chuva-vazão os valores médios mensais de evaporação do tanque classe “A” de Marés afetados do coeficiente de tanque $K_T = 0,7$. Esses dados são registrados no banco de dados associado ao AÇUMOD e apresentados na tabela 10.21.

Tabela 10.21 – Evaporação na Estação de Tratamento de Água de Marés

Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
150,0	132,0	142,0	130,0	117,0	108,0	116,0	123,0	137,0	157,0	155,0	149,0

Os dados fluviométricos dos postos dos rios Mamuaba e Mumbaba do período de 1972 a 1977 serão utilizados para os processos de calibração e validação do modelo. Uma vez validado o modelo, séries pseudo-históricas de vazão serão geradas para todo o período

disponível de precipitação diária na bacia, qual seja de 1972 a 1988. Essas séries serão geradas para diversos pontos na bacia hidrográfica representados na figura 10.13.

Os principais rios que compõem a bacia hidrográfica do rio Gramame, tem as suas nascentes localizadas na proximidade do complexo cristalino na porção SW da bacia, caracterizado por falhas e fraturas. Desenvolvem-se na parte ocidental da bacia em vales encaixados que vão se alargando ao se aproximar da parte oriental da bacia hidrográfica. Observando-se o mapa de solos (figura 3.4, capítulo 3), percebe-se que os pequenos afluentes da margem esquerda do rio Gramame, no seu alto curso, e o próprio rio Gramame no seu curso médio na proximidade do açude de Gramame, desenvolvem-se onde os solos são predominantemente Podzol Hidromórfico. Tais solos são arenosos e profundos, com taxa de infiltração elevada e baixa retenção de água. São solos geradores de escoamento retardado. Já os solos podzólicos com fragipan, quer sejam eles com textura argilosa e textura média, apresentam permeabilidade razoável até encontrar em torno de 1,50 m de profundidade uma camada impermeável com fraturas. Solos desta natureza, conduzem a escoamentos superficiais relativamente elevados. O aquífero do grupo Barreiras é alimentado por estas fraturas ou falhas, conduzindo a água de precipitação a fluir em direção às calhas do rio com uma cinética bastante baixa. Esses solos predominam na bacia hidrográfica do rio Mumbaba. O baixo curso do rio Gramame, desenvolve-se numa planície com solos de mangue na sua proximidade com o oceano. A partir dos mapas de vegetação, solos e geologia, foi estabelecido um mapa de zonas hidrológicas homogêneas considerando o papel de cada tema sobre os escoamentos superficiais e escoamentos de base. Na figura 10.14 as zonas hidrológicas homogêneas são desenhadas. O nome de cada zona corresponde à características do solo dominante. Para cada zona, no período de calibração, encontram-se os valores de 8 parâmetros, o último, utilizado para gerar escoamentos superficiais em solos parcialmente impermeabilizados, foi mantido ao valor 0,00.

10.2.4.2 – Calibração e Validação do modelo AÇUMOD

A calibração do modelo é feita manualmente comparando as vazões geradas pelo modelo com as vazões observadas nos dois postos fluviométricos já citados no período de 1972 a 1974. Com o AÇUMOD, a calibração é feita zona por zona considerando sucessivamente aquelas de maior abrangência espacial para um determinado posto fluviométrico. No caso da zona chamada de aluviões, por não dispor de observações para calibrá-la, os valores foram tirados de um estudo feito na bacia hidrográfica do rio do Peixe (Silans et al., 2000). No caso da zona chamada de zona saturada onde foram agrupados os

FIGURA 10.13 – PONTOS DE CÁLCULO

FIGURA 10.14 – ZONAS HIDROLÓGICAS HOMOGÊNEAS

solos Gleys e os solos de Mangue, não existem informações para calibrá-la. Assim foram escolhidos parâmetros de modo a não haver escoamentos de base e permitir que toda precipitação seja repartida em escoamentos superficiais e evapotranspiração potencial, com um efeito médio de retardamento para simular a possibilidade de acumulação em regiões pantanosas. Os valores obtidos para os respectivos parâmetros são listados a seguir para cada zona hidrológica (Tabela 10.22). Para evitar subjetividade nos valores iniciais para os reservatórios superficiais e subterrâneos, uma simulação a frio foi efetuada durante três anos, antes de iniciar o período de calibração.

Tabela 10.22 – Parâmetros do modelo AÇUMOD

Zonas Hidrológicas	Crt	Dcrt	Fn	Cqr	QRmax	Cqi	QImax
Fragipan	850	20	-2,0	0,6	500	0,002	800
Arenosos	910	10	-10,0	0,4	500	0,030	50
Argiloso	700	2	-5,0	0,4	700	0,005	400
Aluviões	400	120	-20,0	0,4	250	0,400	250
Saturados	150	70	3,0	0,4	80	0,400	80

Os índices de qualidade da calibração são apresentados na tabela 10.23 e as curvas correspondentes nas figuras 10.15, a e b.

Tabela 10.23 – Indicadores de qualidade da calibração.

Indicadores	Mumbaba		Mamuaba	
	Calc	Obs.	Calc	Obs
Média	2,59	2,59	2,06	2,04
Desvio Padrão	1,52	1,72	1,39	1,29
Máxima	6,98	8,41	6,94	6,33
Mínima	1,16	0,93	0,72	0,85
Rendimento	0,33	0,33	0,31	0,31
RMSE	0,13		0,07	
Correlação	0,90		0,95	
Pbias	0,00		0,02	

Os valores encontrados para os parâmetros no período de calibração (Tabela 10.22) foram utilizados para gerar as vazões no período 1975 a 1977. Estas foram comparadas com as vazões observadas no mesmo período com a finalidade de validar o modelo. As curvas obtidas com os valores brutos observados são representadas nas figuras 10.16, a e b. Os índices de qualidade da validação foram apresentados na tabela 10.24.

FIGURA 10.15 A – CALIBRAÇÃO MUMBABA (1972-1974)

FIGURA 10.15 B – CALIBRAÇÃO MAMUABA (1972 – 1974)

FIGURA 10.16 A – VALIDAÇÃO MUMBABA (1975-1977)

FIGURA 10.16 B – VALIDAÇÃO MAMUABA (1975-1977)

Tabela 10.24 – Indicadores de qualidade da validação

Indicadores	Mumbaba		Mamuaba	
	Calc	Obs.	Calc	Obs
Média	1,67	1,94	1,36	1,35
Desvio Padrão	0,83	1,01	0,82	1,22
Máxima	3,96	6,26	4,20	6,11
Mínima	0,84	0,80	0,56	0,35
Rendimento	0,24	0,23	0,24	0,24
RMSE	0,13		0,08	
Correlação	0,71		0,96	
Pbias	-0,27		0,00	

Posteriormente, os períodos de calibração e validação foram invertidos para efetuar nova calibração. Os resultados aparecem nas três tabelas seguintes. Poucas diferenças são observadas quando se inverte os períodos de calibração e validação. No entanto, as vazões de base parecem ser melhor restituídas com os parâmetros oriundos da calibração sobre o período de 1972 a 1974. São esses parâmetros (tabela 10.22) que serão adotados no resto do trabalho.

Tabela 10.25 – Parâmetros do modelo AÇUMOD com calibração no período 1975 - 1977

Zonas Hidrológicas	Crt	Dcrt	Fn	Cqr	QRmax	Cqi	QImax
Fragipan	880	2	-0,1	0,6	500	0,001	800
Arenosos	800	10	-1,0	0,4	500	0,030	50
Argiloso	800	2	-3,0	0,4	700	0,005	400
Aluviões	400	120	-20,0	0,4	250	0,400	250
Saturados	150	70	3,0	0,4	80	0,400	80

Tabela 10.26– Indicadores de qualidade da calibração no período 1975-1977

Indicadores	Mumbaba		Mamuaba	
	Calc	Obs.	Calc	Obs
Média	1,74	1,94	1,36	1,35
Desvio Padrão	1,13	1,01	0,98	1,22
Máxima	4,76	6,26	4,40	6,11
Mínima	0,61	0,80	0,47	0,35
Rendimento	0,25	0,23	0,24	0,24
RMSE	0,13		0,07	
Correlação	0,74		0,95	
Pbias	-0,20		0,01	

Tabela 10.27 – Indicadores de qualidade da validação no período 1972-1974

Indicadores	Mumbaba		Mamuaba	
	Calc	Obs.	Calc	Obs
Média	2,57	2,59	2,06	2,04
Desvio Padrão	1,77	1,72	1,57	1,29
Máxima	7,67	8,41	7,43	6,33
Mínima	0,80	0,93	0,57	0,85
Rendimento	0,33	0,33	0,31	0,31
RMSE	0,11		0,08	
Correlação	0,93		0,96	
Pbias	-0,02		0,02	

Nas tabelas 10.28 e 10.29, são comparadas as vazões calculadas pelo modelo e observadas no período 1972-1977.

10.2.4.3- Geração de séries pseudo-históricas de vazões naturais

O AÇUMOD permite calcular séries de vazão em diversos pontos da bacia hidrográfica. No mapa da figura 10.13, já apresentado, pode-se observar os pontos escolhidos. Correspondem aos postos fluviométricos, às captações de água para abastecimento humano, industrial e para a irrigação, aos exutórios de sub-bacias e outros pontos onde futuramente captações e barragens poderão ser implantados. No caso da irrigação, estes pontos são fictícios e agrupam diversos usuários com captações reais, as vezes de porte muito pequeno. Estes pontos serão chamados no texto de pontos de cálculo. Na figura 10.17, a bacia discretizada é apresentada. Para estes pontos as vazões geradas no período 1972 – 1988, são fornecidas nas tabelas 10.30 a 10.58, e gravadas no arquivo “Vazões_AÇUMOD.xls”.

10.2.5 – Geração sintética de séries longas de vazão por modelo estocástico ou redes artificiais de Neurônios.

As séries pseudo-históricas de vazões mensais geradas pelo modelo chuva-vazão tem apenas 17 anos. Para estudos de potencialidade e disponibilidades é recomendável a utilização de séries longas. Neste ítem séries longas de vazão serão geradas por dois métodos diferentes: Geração estocástica e geração através de redes artificiais de Neurônios.

10.2.5.1 – Geração estocástica de séries longas de vazões mensais.

10.2.5.1.1 - Metodologia

TABELA 10.28 – VAZÕES OBSERVADAS E CALCULADAS NO POSTO
FLUVIOMÉTRICO MUMBABA

TABELA 10.29 – VAZÕES OBSERVADAS E CALCULADAS NO POSTO
FLUVIOMÉTRICO MAMUABA

FIGURA 10.17 – BACIA DISCRETIZADA

TABELA 10.30 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 26

TABELA 10.31 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 42

TABELA 10.32 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 43

TABELA 10.33 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 47

TABELA 10.34 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 48

TABELA 10.35 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 68

TABELA 10.36 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 79

TABELA 10.37 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 132

TABELA 10.38 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 133

TABELA 10.39 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 135

TABELA 10.40 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 136

TABELA 10.41 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 139

TABELA 10.42 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 151

TABELA 10.43 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 158

TABELA 10.44 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 185

TABELA 10.45 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 194

TABELA 10.46 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 219

TABELA 10.47 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 222

TABELA 10.48 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 231

TABELA 10.49 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 233

TABELA 10.50 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 234

TABELA 10.51 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 241

TABELA 10.52 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 255

TABELA 10.53 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 265

TABELA 10.54 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 280

TABELA 10.55 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 302

TABELA 10.56 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 328

TABELA 10.57 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 346

TABELA 10.58 – VAZÕES GERADAS PELO AÇUMOD PARA O PONTO 347

Muitos são os modelos que podem ser utilizados para tal, dentre os diversos modelos de geração de séries sintéticas foi escolhido o modelo sazonal de Thomas e Fiering (1962). Este modelo é composto por 36 parâmetros sendo estes: os 12 valores de médias mensais, os 12 desvios padrões mensais e os 12 coeficientes de correlações mensais, mais um fator aleatório para que este modelo reflita o caráter estocástico das vazões.

O algoritmo para o modelo sazonal de Thomas e Fiering:

$$x_{i+1} = \overline{x_{j+1}} + b_j * (x_i - \overline{x_j}) + t_i * S_{j+1} * \sqrt{(1-r_j^2)}$$

Onde: x_{i+1}, x_i - fluxos gerados durante os meses (i+1), i, contadas do começo das seqüências sintetizadas.

$\overline{x_{j+1}}, \overline{x_j}$ - fluxos médios durante os meses (j+1) e j ($1 \leq j \leq 12$).

b_j - coeficiente de regressão calculado pelo método dos mínimos quadrados entre o fluxo do mês (j+1) e o fluxo do mês anterior j:

$$b_j = r_j * \frac{S_{j+1}}{S_j}$$

t_i - variável aleatória Normal com média 0 e variância 1

S_{j+1}, S_j - desvios padrões dos fluxos durante os meses (j+1) e j

r_j - coeficiente de correlação seriado entre os fluxos dos meses j e (j+1)

A utilização deste modelo, para a bacia do rio Gramame-Mamuaba, se deu pelo fato dele ser bem aceito por técnicos e pesquisadores para rios perenes, de forma que ele já é um modelo consolidado neste meio, inclusive já tendo sido aplicado na sub-bacia do rio Mumbaba (Figueiredo, 1995), com sucesso. No entanto, correções foram feitas para a variável t_i , considerando que as vazões mensais apresentam uma distribuição assimétrica e consequentemente não são normalmente distribuídas. Trata-se da correção dita W-H de Wilson e Hilferty (McMahon e Mein, 1986).

10.2.5.1.2 - Resultados

Para cada ponto de cálculo, uma série de 200 anos, ou seja 2400 dados mensais foi gerada pelo modelo de Thomas-Fiering com a correção W-H. Para cada ponto, os valores

mínimos, máximos, médios e o desvio-padrão foram calculados e são listados na tabela 10.59. É importante notar aqui, que essas séries sintéticas foram geradas a partir de uma série pseudo-histórica de 17 anos apenas. Deste modo não pretende representar feições estatísticas que não pertencem aos 17 anos considerados, o que constitui uma limitação séria ao estudo de garantia.

10.2.5.2 – Geração sintética de séries longas de vazão por redes artificiais de Neurônios.

10.2.5.2.1 – Metodologia

As redes artificiais de Neurônios pertencem à família de novas tecnologias sobre a inteligência artificial. Uma rede artificial de Neurônios é constituída de várias camadas de Neurônios: uma camada de entrada; uma ou várias camadas escondidas e uma camada de saída. Os neurônios da camada de entrada correspondem às séries temporais de dados de entrada do modelo. Os neurônios da camada de saída correspondem às séries temporais da saída do modelo. O número de neurônios por camada e o número de camadas escondidas devem ser calibrados na fase de treinamento da rede. Exemplificando no caso da bacia hidrográfica do rio Gramame. Dispõe-se de séries pseudo-históricas de 17 anos de observações geradas pelo modelo AÇUMOD. Os postos pluviométricos de També e Alhandra, vizinhos à bacia hidrográfica tem um período comum de observação de 1936 a 1991, ou seja 56 anos. Neste item tenta-se ampliar a série pseudo-histórica original de 17 anos com as informações desses dois postos pluviométricos, utilizando uma rede de neurônios artificiais de tipo perceptron. A camada de entrada é constituída por 6 neurônios: a precipitação mensal do posto Alhandra; a precipitação do mês anterior do posto Alhandra; a precipitação mensal do posto També; a precipitação do mês anterior do posto També; a evaporação do tanque classe A da estação de Marés e um fator de sazonalidade que indica se o mês considerado corresponde ao trimestre mais chuvoso ou outro. A camada de saída é constituída pela vazão em um ponto de cálculo da bacia hidrográfica. Na fase de treinamento, procura-se obter a melhor arquitetura para que a rede de neurônios aprende a gerar as vazões observadas ao longo dos 17 anos disponíveis. Uma vez a rede de Neurônios corretamente treinada, admite-se que é capaz de reproduzir as vazões no período de 1936 a 1991.

10.2.5.2.1 – Resultados

Para cada ponto de cálculo na bacia, a arquitetura que melhor se adaptou é citada na tabela 10.60, assim como o coeficiente de correlação entre os valores calculados pela rede e os valores observados na fase de treinamento. Observa-se que para todos os pontos, os valores

TABELA 10.59 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS, DESVIOS, MÁXIMOS E MÍNIMOS DOS VALORES DE VAZÃO GERADOS PELO AÇUMOD COM OS VALORES CALCULADOS COM O MODELO DE THOMAS-FIERING

TABELA 10.59 (CONTINUAÇÃO)

TABELA 10.60 – MELHOR ARQUITETURA PARA CADA PONTO DE CÁLCULO

de correlação são relativamente baixos. Nas tabelas 10.61 a 10.63, apresenta-se a título de exemplo uma comparação no período de treinamento entre os valores gerados pelo AÇUMOD e os valores calculados pela rede de Neurônios artificiais em três pontos: o posto fluviométrico de Mamuaba; o posto fluviométrico de Mumbaba e a captação da GIASA. Destes resultados, observa-se que a rede foi capaz de reproduzir razoavelmente bem as maiores vazões mensais, mas falhou em reproduzir as vazões mínimas mensais, as quais serão utilizadas para determinar as disponibilidades hídricas na maioria dos pontos de cálculo.

10.3 - Estimativa das potencialidades da bacia hidrográfica do rio Gramame.

A potencialidade hídrica de uma bacia representa a quantificação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica sem a intervenção humana, ou seja em seu estado natural. É representada pela média aritmética da série histórica de vazões naturais. O seu valor para uma sub-bacia indica a vazão média máxima teoricamente possível de ser utilizada. Na realidade a quantidade máxima que pode ser disponibilizada para uso da água corresponde a uma fração da potencialidade, tipicamente 60%.

Neste item são calculadas as potencialidades da bacia hidrográfica do rio Gramame, assim como de suas principais sub-bacias. O valor é indicado na tabela 10.64 em m³/s assim como em m³/ano.

Tabela 10.64 – Potencialidades na bacia do rio Gramame

Bacia ou sub-bacia	Potencialidade em m ³ /s	Potencialidade em m ³ /ano
Rio Gramame a montante do açude	1,80	56.795.904,0
Rio Mamuaba	1,83	57.742.502,4
Rio Mumbaba	2,38	75.096.806,0
Riacho da Salsa	0,51	16.092.172,8
Rio Água Boa	1,28	40.388.198,4
Bacia do Rio Gramame	9,50	299.756.160,0

Na tabela 10.65 constam parâmetros estatísticos assim como outras informações sobre as séries de vazão geradas para os exutórios das sub-bacias consideradas.

10.4 – Vazões de referência e vazões regularizáveis pelos açudes.

Conforme o Decreto Estadual nº 19.260/97 que regulamenta a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, a vazão de referência para calcular os volumes outorgáveis

TABELA 10.61 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE VAZÕES GERADOS PELO AÇUMOD E OS VALORES CALCULADOS PELAS REDES NEURAIIS NO PONTO DO POSTO FLUVIOMÉTRICO MAMUABA

TABELA 10.62 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE VAZÕES GERADOS PELO AÇUMOD E OS VALORES CALCULADOS PELAS REDES NEURAIIS NO PONTO DO POSTO FLUVIOMÉTRICO MUMBABA

TABELA 10.63 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE VAZÕES GERADOS PELO AÇUMOD E OS VALORES CALCULADOS PELAS REDES NEURAIIS NO PONTO DE CAPTAÇÃO D'ÁGUA DA GIASA

TABELA 10.65 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS SÉRIES DE VAZÕES
GERADAS NAS PRINCIPAIS SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO GRAMAME

corresponde a vazão natural da curva de permanência com 90% de probabilidade de ser ultrapassada (Q90) ou à vazão regularizável pelo açude com um nível de garantia de 90%. A estimativa desses valores é feita a partir de séries longas de vazões obtidas do modelo de geração estocástico. No caso deste estudo a base geradora das séries longas de vazões tem duração de 17 anos, apenas. Segundo o teorema central limite, o valor médio desta série é estimado com uma incerteza de 18,5% quando se considera um nível de confiabilidade de 95%. Assim a incerteza sobre os valores gerados estocasticamente não é desprezível e afeta sensivelmente as vazões mais baixas. Após efetuar uma comparação entre os Q90 calculados com série histórica de 200 anos e diversos valores de Qx calculado com a série histórica gerada pelo AÇUMOD, escolheu-se o valor de Q98 como representativo da vazão de referência.

Para cada ponto de cálculo (ver mapa da figura 10.13) traçou-se a curva de permanência das vazões médias mensais, e considerou-se como vazão de referência de cada ponto, a vazão correspondente à frequência acumulada de 98%. Estas vazões encontram-se na tabela 10.66.

Calculou-se também as curvas de garantia para o açude Gramame-Mamuaba assim como para o açude projetado no rio Mumbaba. As vazões regularizáveis correspondendo a diversos níveis de garantia são apresentados na tabela 10.67.

Tabela 10.67 – Vazões regularizáveis (m³/s)

Açude	Garantia		
	100%	99%	98%
Gramame-Mamuaba	2,11	2,87	3,13
Mumbaba	1,59	1,92	2,05

TABELA 10.66 - VAZÕES DE REFERÊNCIA

10.5 – Referências Bibliográficas

- ATECEL, 1994, *Plano Estadual dos Recursos Hídricos – Disponibilidade Hídrica Superficial*, Governo do Estado da Paraíba, Secretaria de Planejamento. Campina Grande.
- DINIZ, L. da S., 1994, - *Calibração automática de modelos chuva-vazão usando um algoritmo genético*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 130 p.
- DNAEE, 1983,- *Modelo SIMMQE - Conceituação*. Ministério das Minas e Energia - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, 87 p.
- DNAEE, 1987, *Inventário das Estações Fluviométricas*. Ministério das Minas e Energia - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Brasil Sul Editora Ltda., Brasília - DF.
- FIGUEIREDO, Paulo Henrique Silva & SILVA, Tarciso Cabral da, 1995, *Um método automático com elementos estocásticos para determinação de capacidade de açudes vazão regularizável e superfície útil irrigável*. ANAIS SICTEC. Recife : 8 a 11 de outubro de 1995.
- MCMAHON, T.A.; & MEIN, R.G., 1986, *River and Reservoir Yield*. Water Resources Publications, Littleton, U.S.A.
- PASSERAT DE SILANS, A.M.B., Almeida, C.N., Albuquerque, D.J.S. e Paiva, A.E.D.B., 2000, *Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do Peixe*, submetido à Revista Brasileira de Recursos Hídricos.
- PAIVA, A.E.D.B, Passerat de Silans, A.M.B, Albuquerque, D.J.S. e Almeida, C.N., 1999, *Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do Rio Taperoá - Estado da Paraíba*. Anais em CD-ROM, XIII Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos, Belo Horizonte 28/11 a 02/12 1999.
- SERHID, 1997, *Plano Estadual dos Recursos Hídricos*, Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte, v. 1 a v. 3.
- SRH/PE, 1998, *Sistema de Informações de Recursos Hídricos de Pernambuco – Subsistema de Macroplanejamento – Macroplan*, Ministério do Meio Ambiente, Governo do Estado de Pernambuco, Secretaria de Recursos Hídricos, Cd-Rom
- SUDENE, 1984, - *Dados Climatológicos do Nordeste*. Recife, 56p.
- SUDENE/DPV/PRN/APR. MOLLE, F e CADIER, E, 1992, *Manual do Pequeno Açude*, Recife.

- THOMAS, H. A. & FIERING, M. B., 1962, *Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation*. Em Design of Water Resources Systems (A. Maass et al., Eds.), Havard University
- TUCCI, C.E.M., 1993, *HIDROLOGIA – Ciência e Aplicação*. Porto Alegre, Ed. Da Universidade: ABRH: EDUSP. Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 4
- VILLELA, S.M. e MATTOS, A., 1975, - *Hidrologia Aplicada* – Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 245 p.