

APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO AÇUMOD À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO PEIXE - ESTADO DA PARAÍBA

**Alain M. B. Passerat de Silans, Cristiano das Neves Almeida,
Diego J. S. de Albuquerque e Ana Emilia D. B. Paiva**

Centro de Tecnologia - Universidade Federal da Paraíba
Campus I –CEP 58050-900 João Pessoa, PB
alain@ct.ufpb.br

RESUMO

O planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas da região nordeste do Brasil requerem informações sobre potencialidade e disponibilidade em pontos específicos da bacia hidrográfica onde existem açudes, pontos de captação ou outros interesses. A geração dessas informações deve ser feita utilizando um modelo de transformação da chuva em vazão. Neste trabalho, descreve-se o AÇUMOD, um modelo hidrológico distribuído, especificamente desenhado para esta região. Uma aplicação do modelo está apresentada para a bacia do Rio do Peixe no Estado da Paraíba. A sua ótima performance é demonstrada. Enfatiza-se o interesse desse modelo, pois ele permite a utilização, para a sua calibração, de todas as informações disponíveis, entre outras, os níveis de água nos açudes simulados e observações de vazão efetuadas em postos fluviométricos que são "perturbados" pela existência de açudes a montante, o que, na prática, representa a maioria dos casos.

INTRODUÇÃO

O planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica requerem um conhecimento profundo dos mesmos. Isto implica em dispor ao longo do tempo, assim como no espaço geográfico da bacia hidrográfica, de informações relativas às quantidades de água armazenadas, às vazões na rede de drenagem, aos usos dos recursos hídricos e a qualidade da água.

As medições hidrológicas constituem uma base importante de informações, porém, elas não são contínuas no espaço e no tempo. Na região nordeste do Brasil, talvez mais do que em outras regiões, são poucas as séries históricas de informações disponíveis quanto aos volumes armazenados nos açudes ou às vazões nos cursos de água e praticamente inexistentes aquelas relativas à qualidade da água. Já as informações sobre pre-

cipitações são muito mais densas e, geralmente, encontra-se séries históricas relativamente longas.

Frente a essas dificuldades, os hidrólogos têm desenvolvido modelos matemáticos capazes de transformar a chuva em vazão, através de um conjunto de equações que procuram representar as diversas fases do ciclo hidrológico (Tucci, 1998). Vê-se então que o relevo, a geologia, o tipo de solo e o tipo de ocupação do solo são parâmetros que, de uma forma ou de outra, devem ser incorporados ao modelo (Beven e Moore, 1994).

Os modelos hidrológicos ditos concentrados, consideram a bacia hidrográfica como uniforme e geram lâminas escoadas ou volumes escoados a partir de uma série histórica da precipitação média sobre essa bacia.

Os modelos hidrológicos distribuídos procuram incorporar a variabilidade espacial dos parâmetros descritivos da geologia, da natureza do solo, da ocupação do solo e do relevo, assim como a distribuição espacial da precipitação, e, eventualmente, da evapotranspiração potencial.

Tanto os modelos concentrados como os modelos distribuídos devem ter os seus parâmetros calibrados. A calibração se faz, ajustando tais parâmetros de modo a obter vazões calculadas que representam o mais fielmente possível, as vazões observadas. A calibração dos modelos distribuídos é então, consideravelmente mais complexa porque o número de parâmetros a ajustar é muito maior. Na realidade esta só pode ser efetuada corretamente, se dispor de postos fluviométricos em diversos locais da bacia hidrográfica de modo que os dados de vazão representem a diversidade fisiográfica.

Na região semi-árida do nordeste do Brasil, onde os rios são intermitentes, o principal modo de armazenar água e torná-la disponível aos diversos usos que dela se faz, é através da construção de açudes que, ao barrar um curso de água, provocam o armazenamento.

Uma análise da história dos recursos hídricos naquela região mostra que a construção de açudes teve início no século passado (Molle,

1994). No início deste século, com a criação da IOCS (Inspetória de Obras Contra as Secas), mais tarde transformada em DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), ações governamentais incentivaram ou promoveram a construção de açudes na região. Mais tarde, a partir de 1962, a SUDENE, assim como diversos programas federais ou estaduais de incentivo à irrigação foram responsáveis pela construção de inúmeros açudes. Em consequência disto, muitos dos postos fluviométricos instalados na rede de drenagem, "perturbados" pela presença sempre crescente de açudes a montante, não podem mais ser utilizados para calibrar modelos chuva-vazão, a menos que os mesmos incorporem nos seus algoritmos o balanço hídrico dos açudes, incluindo a operação dos reservatórios.

O objetivo deste trabalho é de descrever um modelo hidrológico distribuído, o AÇUMOD, com essa característica e mostrar uma aplicação feita com o mesmo na bacia hidrográfica do Rio do Peixe no Estado da Paraíba, situada na região sertão.

DESCRÍÇÃO 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 quadrículas-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 1. Uma quadrícula de lado

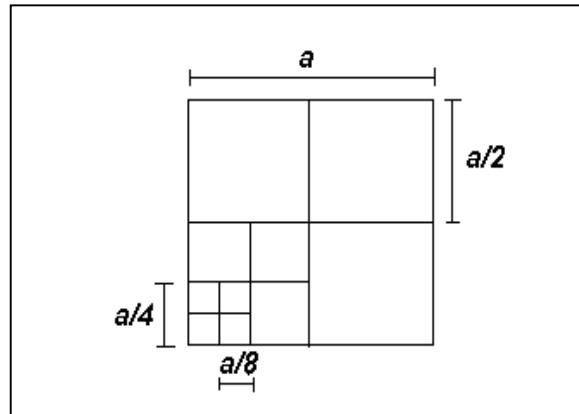


Figura 1. Discretização.

$a/2^n$ ($n = 0, 1, 2$ 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 $a/2^{n-1}$.

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 2, 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.
- **Rio** - São consideradas quadrículas "Rio", aquelas que fazem diretamente a ligação entre um elemento da estrutura hidráulica e outro. Às outras quadrículas isto não é atribuído.
- **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 3). 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 3), atribui-se a cada quadrícula a percentagem de área de cada zona hidrológica homogênea nela contida.

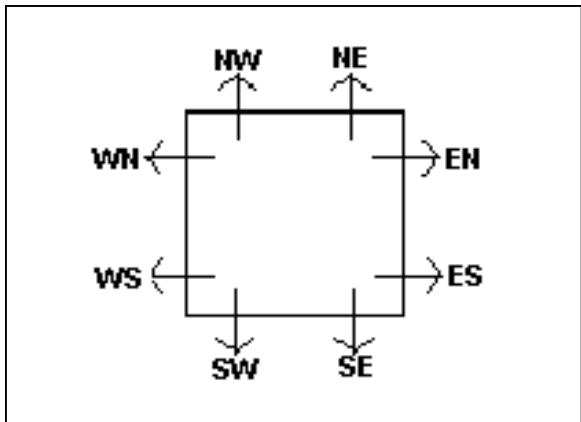


Figura 2. Sentido de drenagem.

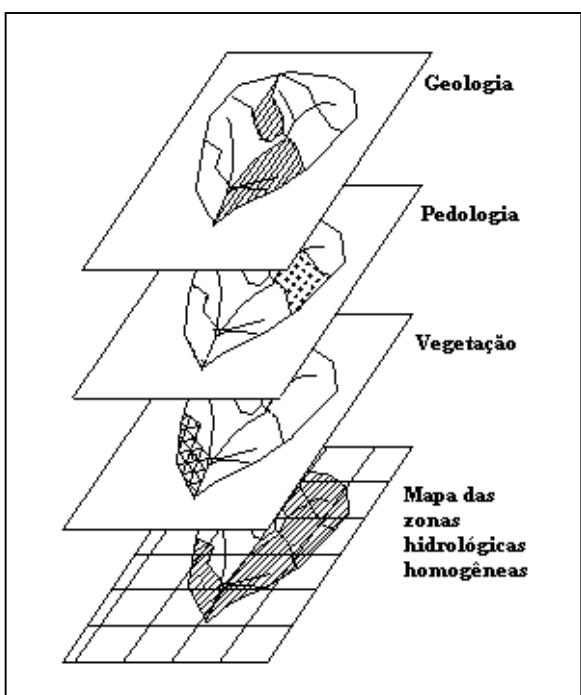


Figura 3. Traçado das zonas hidrológicas homogêneas.

- **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 pluviométricos 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 disso, 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, bem como os pontos de transferências, os postos pluviométricos 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 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 4. 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 Tié, 1993):

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

$$Q_{sur} = (PM - ETP)Krs \text{ se } PM > ETP \quad (2)$$

$$Krs = \text{Min}\left(\frac{R + PM}{R_{max}}, Crs\right) \quad (3)$$

onde PM é a precipitação bruta diária; Crs é o coeficiente máximo do escoamento superficial direto; 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.

A precipitação efetiva é então:

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

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

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

onde Dr é a variação da quantidade de água no solo em mm durante o dia:

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

R_{BA} e R_{HA} correspondem às reservas úteis de água antes e depois da precipitação respectivamente:

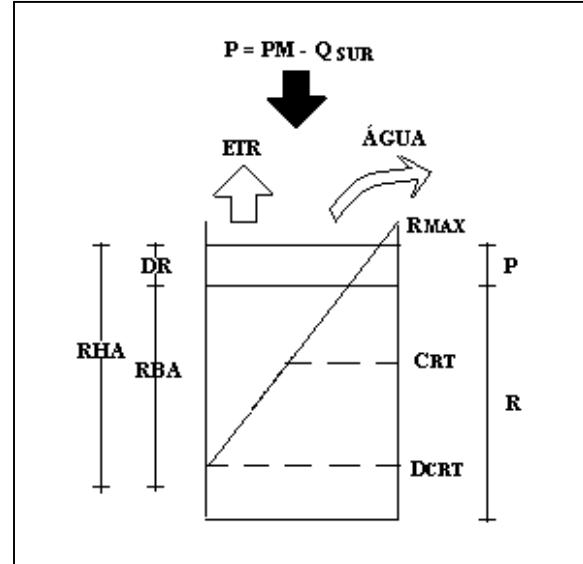


Figura 4. Descrição da função produção de água.

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

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

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

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

$Dcrt$ 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:

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

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

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

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

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

$$QR = \text{Max}(\text{Aqua} - QI, 0) \quad (13)$$

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 5.

Tem-se:

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

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

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

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

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 5):

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

$$Rfreat_{j+1/2} = Rfreat_j + QI \quad (20)$$

$$QII2 = CQI.Rfreat_{j+1/2} \quad (21)$$

$$QII1 = \text{Max}(Rfreat_{j+1/2} - QII2 - QImax) \quad (22)$$

$$Rfreat_{j+1} = Rfreat_{j+1/2} - QII1 - QII2 \quad (23)$$

onde $Rfreat_j$, $Rfreat_{j+1/2}$ e $Rfreat_{j+1}$ representam os níveis de água no reservatório subterrâneo no tem-

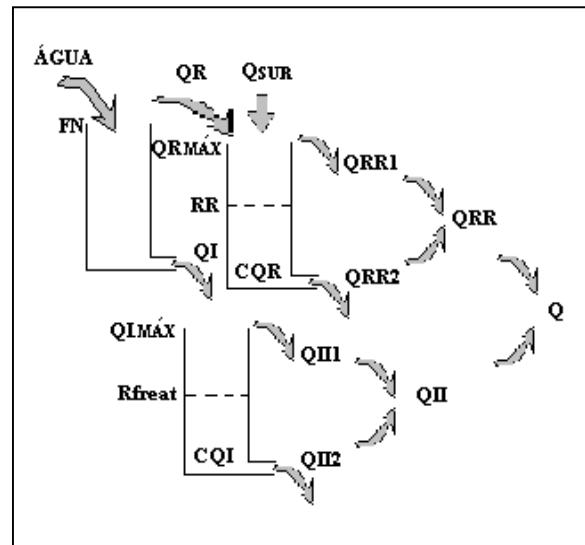


Figura 5. Repartição da quantidade água em escoamento superficial e escoamento de base.

po 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 6. 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:

$$TRF_{i,i+1} = K_0 \cdot d_i / \sqrt{(Z_i - Z_{i+1}) / d_i} \quad (25)$$

onde d_i é a distância dos centros geométricos das quadrículas i e $i+1$; Z_i e Z_{i+1} são respectivamente as

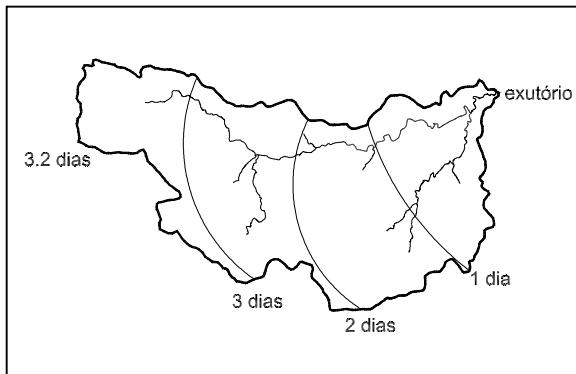


Figura 6. Zonas isócronas.

altitudes das quadrículas i e $i+1$; K_0 é um coeficiente de proporcionalidade a ser determinado.

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:

$$\begin{aligned} T_c &= \text{Max} \left[\sum_{i,i+1=1}^n \text{TRF}_{i,i+1} \right] \\ &= K \cdot \text{Max} \left[\sum_{i,i+1=1}^n d_i / \sqrt{(Z_i - Z_{i+1})/d_i} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

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:

$$N_{zi} = \text{INT} \left[\frac{K_0 \cdot \sum_{i,i+1=1}^n d_i / \sqrt{(Z_i - Z_{i+1})/d_i}}{T_c} \cdot \text{NZC} \right] \quad (27)$$

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 sangradouros 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 introduzida 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.

APLICAÇÃO: RESULTADOS E ANÁLISES

Descrição da bacia hidrográfica do Rio do Peixe

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe é inserida dentro da bacia interestadual do rio Piranhas - Açu e situa-se ao extremo noroeste do Estado da Paraíba entre as latitudes $6^{\circ}20'$ e $7^{\circ}06'$ Sul e entre as longitudes $37^{\circ}57'$ e $38^{\circ}46'$ Oeste no sertão Paraibano.

O Rio do Peixe apresenta suas nascentes na Serra do Padre no município de Uiraúna e deságua no rio Piranhas-Açu no município de Souza, distrito de Aparecida.

A bacia do Rio do Peixe tem uma área de 3476 km² e um perímetro de 371 km. Ela é inteiramente inserida na região do sertão, porém a sua parte sudoeste é classificada segundo Koeppen como região tropical úmida, devido às médias pluviométricas relativamente altas. A classificação pedológica da bacia hidrográfica pode ser resumida em solos rasos (afloramentos de rocha e Litossólos Eutróficos); solos de profundidade média ou outros solos (Bruno não Cálcicos e Podzólicos vermelhos) e aluviões (Figura 7b). Quanto à ocupação dos solos, observa-se através dos mapas de vegetação da região, que o antropismo representa 84,8% da área da bacia hidrográfica. A bacia do Rio do Peixe destaca-se na região pela pressão antrópica, a qual é caracterizada principalmente pela expansão agropecuária. Essa pressão se desenvolve principalmente sobre os aluviões e os solos de profundidade média.

Como em toda a região do sertão, as precipitações são concentradas no ano. Assim, em média, as precipitações nos meses de fevereiro, março e abril, os três mais chuvosos, representam 64% da pluviosidade anual. Vale salientar que a precipitação anual apresenta um coeficiente de variação elevado, o que traduz a irregularidade temporal das precipitações. Uma extensiva análise de consistência dos dados pluviométricos foi efetuada durante os estudos relativos à elaboração do Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia do Rio do Peixe (SEPLAN, 1996) sobre os períodos de 1933 a 1989 e 1962 a 1989 pelo método do Vetor Regional. Verificou-se que a cobertura espacial da precipitação é muito melhor representada pelos postos utilizados no período mais curto de 1962 a 1989 do que por aqueles utilizados no período de 1933 a 1989. Não foi possível preencher as falhas nos anos de 1990 a 1993. Posteriormente, uma análise de consistência foi efetuada também pelo método do Vetor Regional com os dados disponíveis de 01/1994 até 09/1997. Como resultado desses estudos dispõe-se de uma série descontínua de dados consistidos de 1962 até 1997 com um período de interrupção de 1990 até 1993.

A temperatura é elevada ao longo do ano apresentando pouca variação entre os meses de inverno e de verão (Tabela 1). A evapotranspiração mensal média medida pelo tanque Classe A no posto de São Gonçalo situado no município de Souza, mostra um valor muito alto (Tabela 1), responsável por perdas significativas de água nos açudes.

Dez municípios são totalmente ou parcialmente inseridos na bacia, perfazendo uma população total na bacia de 207.571 habitantes no último censo demográfico de 1991, sendo 116.479 habitantes na área urbana e 91.082 na zona rural. Os estudos efetuados pelo Plano Diretor da Bacia do Rio do Peixe (SEPLAN, 1996) prevêem para 1998 uma população total de 227.527 habitantes, sendo 139.293 na área urbana e 88.235 na zona rural.

Na Tabela 2 são apresentados os nomes dos municípios inseridos, quer seja totalmente ou parcialmente na bacia hidrográfica, com os respectivos mananciais e os volumes captados atualmente para abastecimento da população urbana. Os usos muito pequenos para as atividades industriais são aqui confundidos com o abastecimento urbano, visto que são supridos através do mesmo sistema hidráulico.

Os usos mensais para irrigação foram estimados através de informações obtidas de viagem ao campo e utilizando uma metodologia específica baseada nos censos agropecuários do IBGE (Passerat de Silans et al., 1998). Na Tabela 3, são listados os açudes utilizados para irrigação, os pontos de captação ao longo do rio, assim como os consumos mensais estimados para o ano de 1996. A irrigação difusa foi concentrada em alguns pontos de captação para efeito de simulação.

Poucos dados são disponíveis sobre a operação dos reservatórios. Muitos açudes não dispõem de comportas para efetuar qualquer operação no sistema. Dos açudes simulados, foram identificados três que sofrem algum tipo de operação, a qual foi estimada para o ano de 1996 e é indicada, a nível mensal, na Tabela 4.

A Figura 8 representa a bacia hidrográfica com a rede de drenagem principal, os açudes, os pontos de captação para irrigação e a posição dos postos fluviométricos. Na bacia existem dois postos fluviométricos: Antenor Navarro (37260000) com dados de vazão de 1964 a 1972 e Aparecida (37290000) com dados de 1985 a 1994.

Aplicação do AÇUMOD à bacia hidrográfica do Rio do Peixe

A discretização da bacia hidrográfica está representada na Figura 7a. São 388 quadrículas nas quais foram incluídos 45 elementos da estrutura hidráulica, sendo 5 açudes de ordem 1; 16 açudes de ordem 2; 4 açudes em projeto; 11 exutórios de sub-bacias; 8 captações no rio e o provável local da transposição das águas do rio São Francisco.

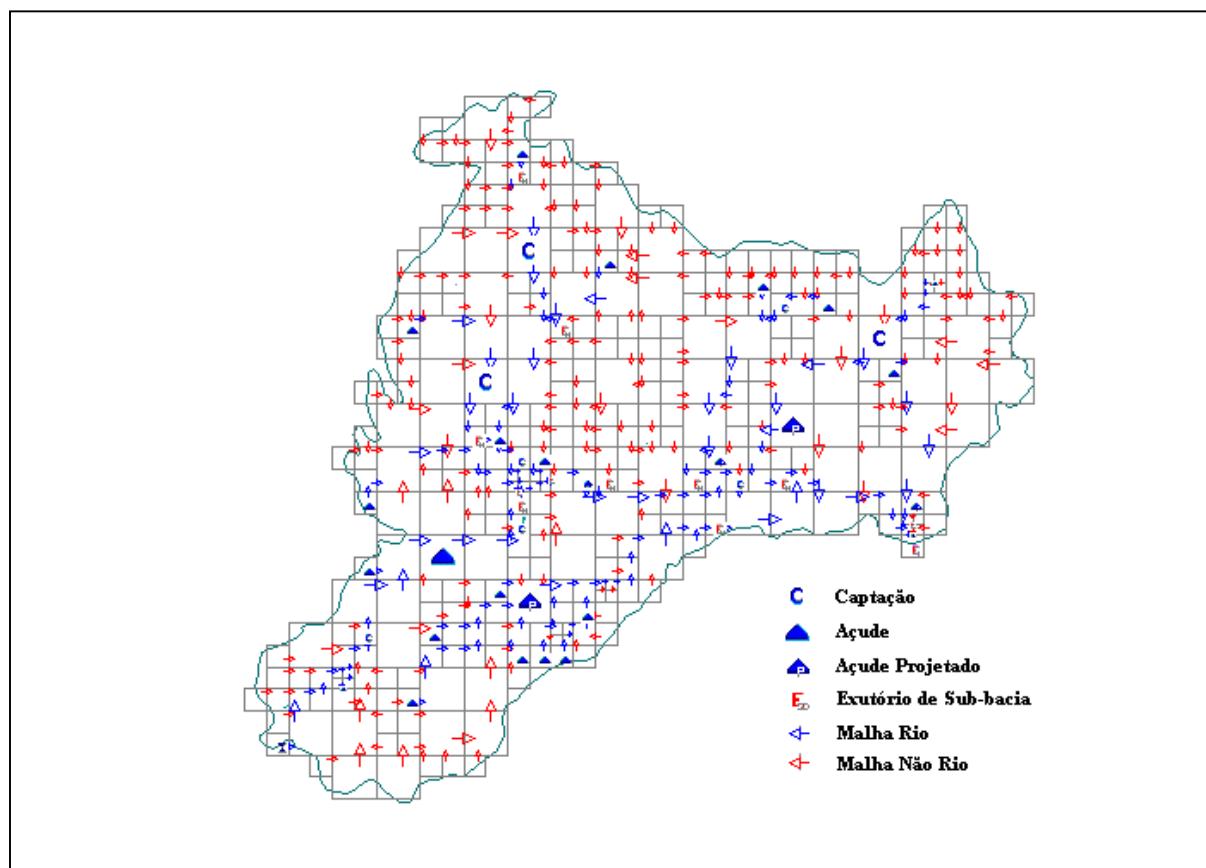
Tabela 1. Dados climatológicos da bacia do Rio do Peixe (posto de São Gonçalo).

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T°C	28,1	28,5	28,2	27,2	27,0	26,0	25,6	26,5	27,3	28,9	29,0	29,1
ETP(mm)	300,7	213,9	195,5	170,0	183,1	176,0	216,4	274,8	315,1	344,7	333,9	332,5

Tabela 2. Sistemas de abastecimento de água na bacia do Rio do Peixe*.

Município	Manancial	Vazão de captação (l/s)
Bom Jesus	Poço tubular	1,5
Cachoeira dos Índios	Aç. Cachoeira da Vaca	6,1
Cajazeiras	Aç. Eng. Ávidos**	122,9
Lastro	Poço Amazonas	1,02
Santa Cruz	Aç. Santa Cruz	1,02
Santa Helena	Aç. Santa Helena	3,9
S. J. do Rio do Peixe	Aç. Chupadouro	30,0
Souza	Aç. São Gonçalo**	197,7
Triunfo	Aç. Gamela	21,0
Uiraúna	Aç. Arrojado	30,0

*Fonte: PDRH-PB SEPLAN, 1996; **Mananciais fora da bacia.



**Figura 7a. Aplicação do AÇUMOD à bacia hidrográfica do Rio do Peixe;
mapa de discretização da bacia.**

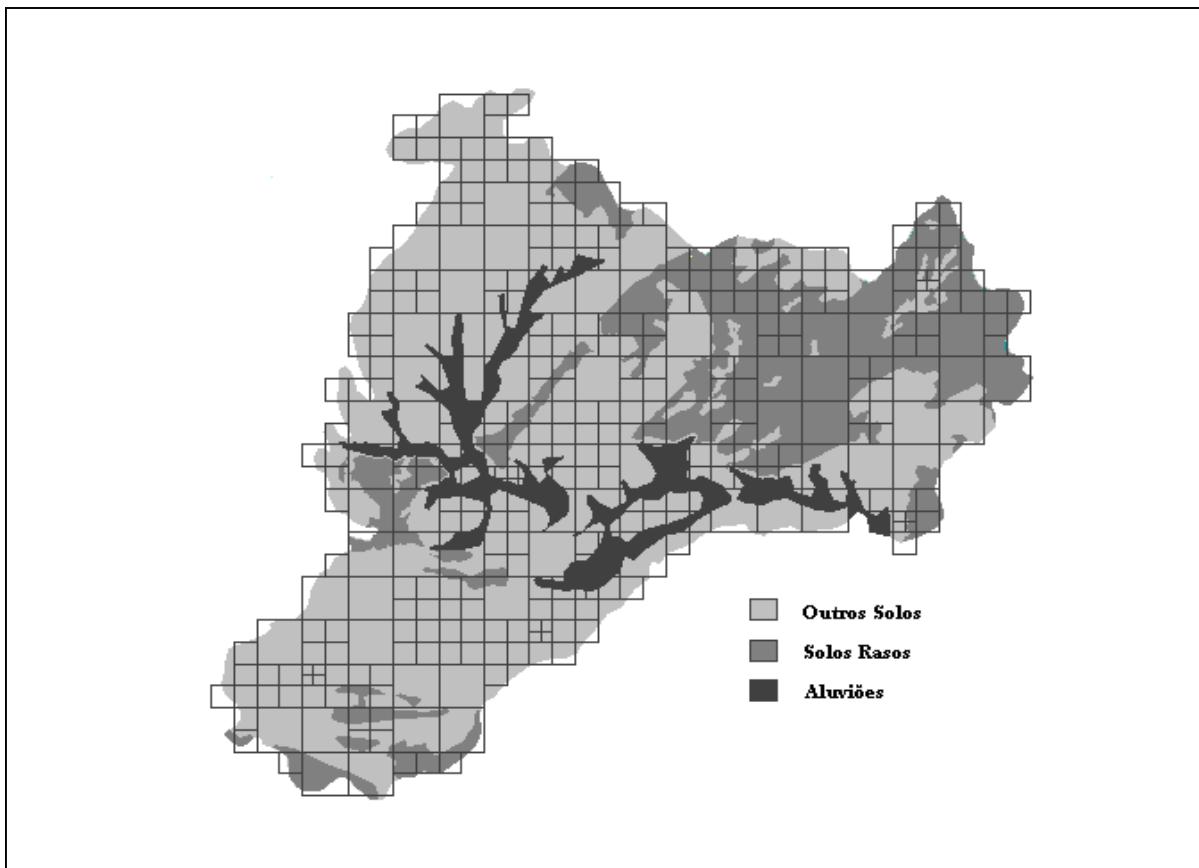


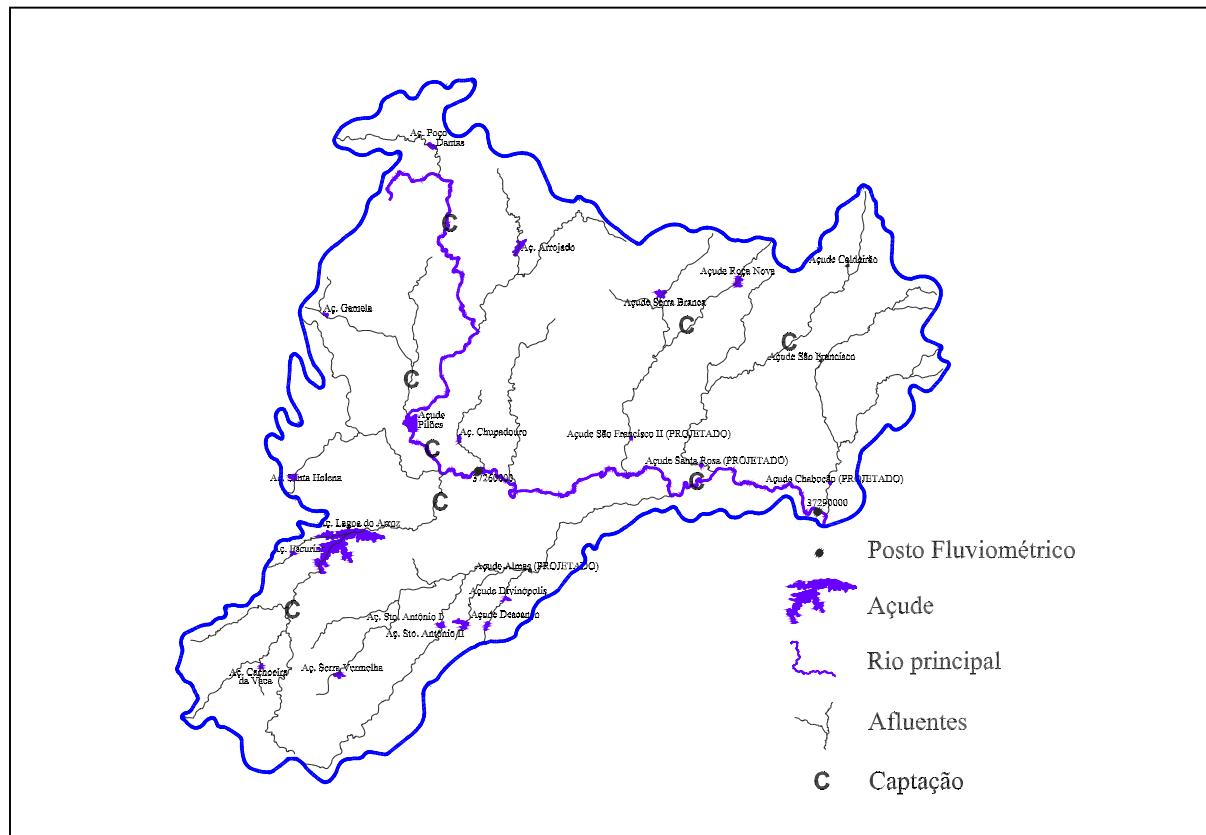
Figura 7b. Aplicação do AÇUMOD à bacia hidrográfica do Rio do Peixe; mapa das funções de produção da bacia.

Tabela 3. Demandas para irrigação estimadas para 1996 (l/s).

Projeto	Manancial	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira dos Índios	Captação	-	-	-	-	38,0	42,0	46,0	57,0	60,0	64,0	634,0	65,0
Lagoa do Arroz	Aç. Lagoa do Arroz	-	-	-	-	4,0	5,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,0	5,0
Souza Maciel	Aç. Souza Maciel	-	-	-	-	25,0	28,0	31,0	38,0	40,0	43,0	43,0	43,0
Santo Antônio I	Aç. Santo Antônio I	-	-	-	-	25,0	28,0	31,0	38,0	40,0	43,0	43,0	43,0
Serra Vermelha	Aç. Serra vermelha	-	-	-	-	25,0	28,0	31,0	38,0	40,0	43,0	43,0	43,0
Santa Helena 1	Captação	-	-	-	-	50,0	68,0	88,0	97,0	96,0	83,0	46,0	47,0
Santa Helena 2	Aç. Santa Helena	-	-	-	-	13,0	17,0	22,0	24,0	24,0	21,0	12,0	12,0
São João do Rio do Peixe 1	Aç. Chupadouro	-	-	-	-	30,0	34,0	39,0	45,0	48,0	47,3	41,0	41,0
São João do Rio do Peixe 2	Captação	-	-	-	-	80,0	90,0	105,0	121,0	128,0	126,0	109,0	110,0
Pilões	Aç. Pilões	-	-	-	-	120,0	135,0	157,5	182,0	192,0	190,0	163,0	166,0
Triunfo	Captação	-	-	-	-	45,5	49,0	53,0	60,5	63,0	65,5	63,5	64,5
Uiraúna	Captação	-	-	-	-	45,5	49,0	53,5	60,5	63,0	65,5	64,0	65,0
Roça Nova	Aç. Roça Nova	-	-	-	-	9,0	11,0	12,5	13,0	11,0	11,5	10,5	10,5
Lastro	Captação	-	-	-	-	36,0	45,0	50,5	51,5	44,0	45,0	42,0	42,0
Souza	Captação	-	-	-	-	144,0	174,0	198,0	242,0	237,0	244,0	232,0	235,5
Serra Branca	Aç. Serra Branca	-	-	-	-	12,5	15,0	17,0	21,0	20,5	21,0	20,0	20,5
Santa Cruz	Captação	-	-	-	-	75,0	94,0	117,0	134,0	123,0	115,0	87,0	88,0

Tabela 4. Vazões de restituição a jusante dos açudes (operação dos reservatórios).

Açude	Restituição (l/s)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Roça Nova	-	-	-	-	40,0	50,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Pilões	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	120,0	140,0	140,0	140,0	140,0	120,0
Lagoa do Arroz	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0

**Figura 8. Bacia hidrográfica do Rio do Peixe.**

Foram desenhadas pelo polígono de Thiessen 15 zonas pluviométricas e foram selecionadas, conforme mostrado na Figura 7b, três zonas hidrológicas homogêneas para as quais, através de processo de calibração, serão determinados os parâmetros do modelo.

O tempo de concentração da bacia foi estimado em 2,8 dias e as perdas ao longo dos cursos de água foram impostas em 10% da variação do volume.

Utilizou-se para a evapotranspiração potencial, os dados de evaporação do tanque classe "A" do posto de São Gonçalo afetado do coeficiente de tanque de 0,85.

Os volumes mensais de água, retirados nos açudes ou nas captações ao longo do rio, para o abastecimento de água para os diversos usos considerados, foram estimados para cada período de simulação do modelo. Nessas estimativas considerou-se, bem evidentemente as datas de construção dos açudes ou de implantação das captações, as informações de que se dispõe sobre os projetos públicos de irrigação; as informações fornecidas pela CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba) quanto ao abastecimento público para consumo humano, quando estas existiam, assim como todas as outras informações que puderam ser levantadas. Em conse-

güência, as estimativas efetuadas para os períodos mais recentes foram de melhor qualidade do que aquelas efetuadas para períodos mais antigos. Em contrapartida, nestes últimos, os volumes retirados eram muito inferiores e, a sua influência no computo geral dos volumes escoados, menos importante.

Os parâmetros do modelo foram calibrados com os dados mensais do posto fluviométrico de Aparecida pelo método manual de tentativas e erros. Neste processo, as curvas comparativas das vazões mensais calculadas e observadas foram traçadas e examinadas. Além disso, procurou-se minimizar o valor da seguinte função objetivo:

$$F = \frac{\sum (Q_{\text{Calc}}^{1/2} - Q_{\text{Obs}}^{1/2})^2}{\sum Q_{\text{Obs}}} \quad (29)$$

onde Q_{Obs} e Q_{Calc} representam respectivamente as vazões observadas e calculadas.

Esta função objetivo, segundo Diniz (1994) enfatiza um ajuste das vazões de baixa magnitude. O ano de 1985 foi muito chuvoso e os outros anos do período de calibração escolhido são considerados médios. No ano de 1985, o pico de vazão no mês de Abril ($Q_{\text{Obs}} = 359 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$) não foi realmente observado mas sim estimado pelo órgão competente (CPRM), tendo em vista a impossibilidade de acesso às réguas neste período. Os parâmetros da função produção de água chamada de "outros solos" foram ajustados com dados de níveis no açude Lagoa do Arroz no período de Dezembro de 1996 a Setembro de 1997, período este onde existem simultaneamente dados de níveis do açude e dados de precipitação. Embora este período esteja muito curto para uma calibração, utilizou-se as informações do açude Lagoa do Arroz pelo fato da sua bacia hidrográfica possuir a 85% solos do tipo "outros solos". Depois, quando da calibração dos parâmetros com o posto fluviométrico de Aparecida, os valores obtidos para a função de produção "outros solos" foram mantidos sem variação.

Resultados

Os valores calibrados dos parâmetros para as três zonas hidrológicas homogêneas estão indicados na Tabela 5. Os parâmetros mais sensíveis são aqueles que definem a quantidade "água": Crt, a capacidade média de armazenamento de água no solo, em mm e Dcrt, a capacidade de armazenamento de água no solo, em mm, abaixo da qual não há escoamento. A Figura 9 mostra o ajuste entre as vazões mensais observadas e calculadas.

Observa-se um ajuste muito bom. É importante enfatizar que a construção do maior açude da bacia hidrográfica, o açude Lagoa do Arroz com capacidade de 80,2 milhões de m³, foi terminada no final do ano 1987. Analisando as curvas da Figura 9, observa-se que o modelo respondeu bem, antes e depois da construção do açude.

O coeficiente de correlação entre vazões calculadas e vazões observadas é de 0,98. O erro quadrático médio é de 8,5% quando se considera o pico de vazão de 1985 e de 6,4% quando se desconsidera este pico. O erro quadrático médio privilegia os picos de vazão, o que não foi feito durante o processo de calibração. O valor da função objetivo F (Equação 29) é de 0,04. Todas essas informações enfatizam a qualidade da calibração efetuada.

Utilizaram-se os dados de vazões observadas no posto de Antenor Navarro, no período de janeiro de 1965 a dezembro de 1972 para validar o modelo. Neste período, apenas sete açudes existiam provavelmente, sendo o mais importante em termos de capacidade o açude Pilões localizado em torno de 70 km à montante do posto fluviométrico, com capacidade de 13 milhões de m³. Os outros açudes são os açudes de Cajazeiras, Escrinho, Poço Dantas, Serra Branca, Roça Nova e Souza Maciel, sendo que esses três últimos foram construídos para dessedentação animal, abastecimento da população local e irrigação. A estimativa dos valores efetivamente captados para estas finalidades é muito difícil, pois não existem informações a respeito. Foram então atribuídos a estes, 50% do consumo estimado para o ano de 1985. Além disto, no Cadastro de Açudes da Paraíba, recentemente publicado (SEPLAN, 1997), para certos açudes da bacia hidrográfica do Rio do Peixe não existem informações sobre a data da construção. Considerou-se arbitrariamente que foram concluídos no final do ano 1980, bem que alguns podiam já existir no período de validação. As vazões calculadas pelo modelo com os parâmetros oriundos da calibração estão comparadas com os valores observados na Figura 10. Desconhecendo-se os níveis iniciais nos açudes, a simulação iniciou em janeiro de 1964 (simulação em branco de janeiro de 1964 a janeiro de 1965) com todos os níveis iniciais arbitrariamente localizados dois metros abaixo da soleira do sangradouro. Na bacia hidrográfica do posto Antenor Navarro, os solos rasos apresentam uma influência muito menor, em termo de ocupação de espaço, do que no posto de Aparecida. Observa-se um ótimo ajuste entre as curvas. Os valores da função objetivo F, do coeficiente de correlação e do erro quadrático médio são respectivamente 0,08, 0,94 e 13%.

O rendimento da bacia hidrográfica foi calculado para o período de calibração e para o período de validação a partir das simulações efetuadas pelo modelo e a partir das observações. Os valores

aparecem na Tabela 6 e mostram resultados coerentes entre si, assim como dentro da faixa dos valores esperados para a região. Os valores mais altos no período de calibração devem-se ao fato

Tabela 5. Parâmetros do modelo calibrado.

Parâmetros	Crt	Dcrt	FN	CQR	QRmax	CQI	Qlmax	Crs
Solos rasos	30,0	5,0	5,0	0,40	20,0	0,01	40,0	0,050
Aluviões	300,0	120,0	25,0	0,40	100,0	0,30	250,0	0,000
Outros solos	380,0	200,0	10,0	0,40	200,0	0,10	40,0	0,005

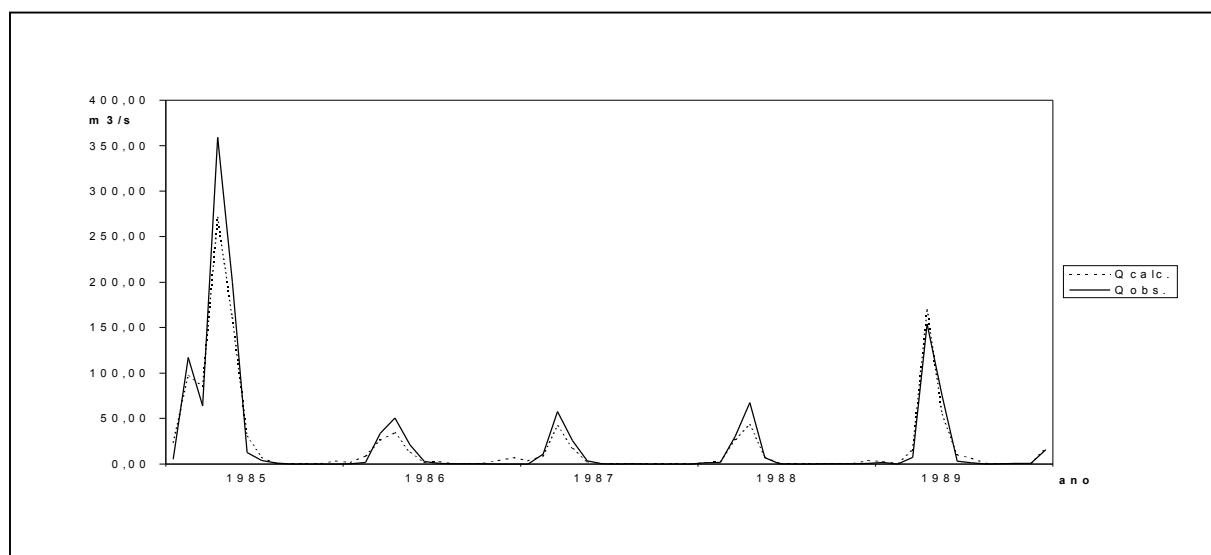


Figura 9. Calibração do modelo no posto Aparecida.

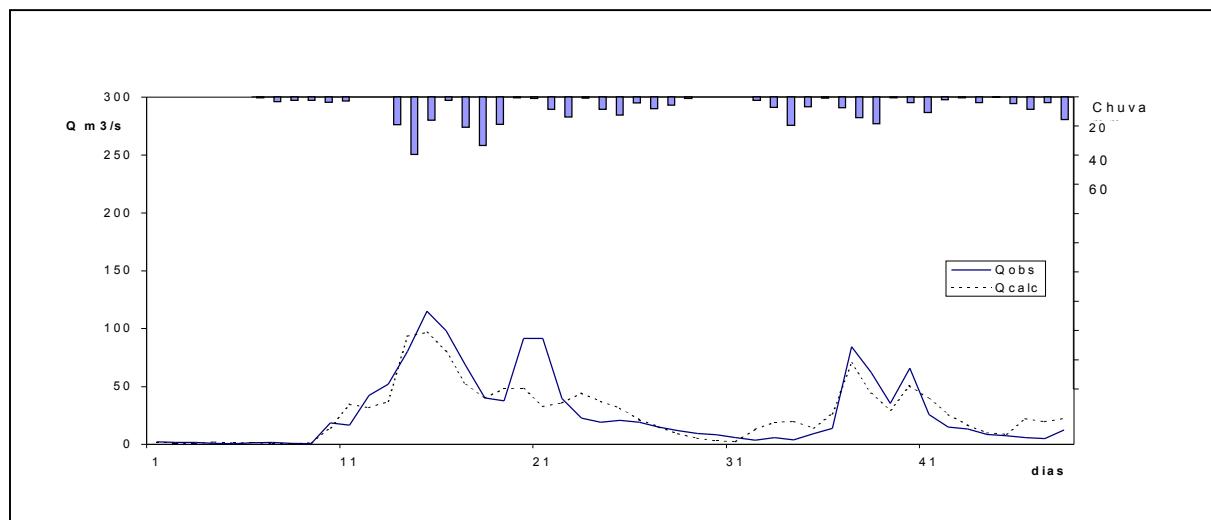


Figura 10. Validação no posto Antenor Navarro.

Tabela 6. Rendimento da bacia hidrográfica do Rio do Peixe.

	Calibração (1985 - 1989)	Validação (1965 - 1972)
Precipitação (mm)	5478	6454
Rendimento observado (%)	15,4	12,1
Rendimento calculado (%)	17,0	10,9

desse período apresentar uma precipitação média acima da normal devido principalmente ao ano 1985.

Embora o modelo tenha sido concebido para gerar vazões mensais, no seu algoritmo de cálculo, ele estima as vazões a cada dia. O modelo, como já explicado anteriormente, foi calibrado sobre observações médias mensais. Mesmo assim, apresenta-se na Figura 11 uma comparação entre as vazões diárias calculadas e observadas durante um mês e meio do ano de 1988, no posto fluviométrico de Aparecida. Pode-se observar na Figura 9 uma ótima resposta do modelo. É bom lembrar que a montante deste posto fluviométrico existem 21 açudes operando normalmente durante o período de simulação.

Dados de observação de níveis mensais de água dos açudes existem na bacia hidrográfica do Rio do Peixe desde novembro de 1996 para os açudes Lagoa do Arroz, Pilões, Arrojado, Gamela e Chupadouro. Na realidade, apenas o açude Lagoa do Arroz tem registros confiáveis na totalidade deste período. Efetuou-se uma simulação da bacia hidrográfica de dezembro de 1996 a setembro de 1997 e compara-se na Figura 12 os dados de níveis de água observados e calculados para o açude Lagoa do Arroz. A comparação não é boa. Uma análise pormenorizada dos dados permite observar que no primeiro mês onde não ocorreu precipitação na bacia hidrográfica, a queda do nível de água simulada pelo modelo é insuficiente. Isto se deve provavelmente a uma sub-estimação das retiradas de água no açude ou dos valores restituídos a jusante através da comporta. Observa-se também que em período chuvoso, o nível do açude sobe rápido demais. A área de influência do posto de Cajazeiras calculada pelo polígono de Thiessen, na bacia hidrográfica do açude Lagoa do Arroz corresponde a 95% da área da bacia hidrográfica, o que faz com que a simulação no mês chuvoso seja efetuada considerando uma repartição espacial da chuva praticamente uniforme. Na realidade a varia-

bilidade espacial da precipitação na bacia hidrográfica do açude pode ser importante e o valor da precipitação média ser bem inferior aquele utilizado no modelo. Além disso, a forma da curva simulada é parecida com a forma da curva das observações.

CONCLUSÕES

O modelo hidrológico distribuído AÇUMOD foi desenhado para gerar vazões e níveis de reservatórios mensais em regiões semi-áridas. Pelo fato de incorporar dentro do algoritmo de geração de vazão o balanço hídrico dos açudes que estão situados a montante do ponto de cálculo, o modelo é capaz de traduzir a situação real em termo de escoamento, considerando todas as operações feitas nos reservatórios. Neste sentido, ele se torna muito útil para estudos de planejamento e gestão dos recursos hídricos. Além do mais, permite que observações de vazões em postos fluviométricos que são perturbados pela presença de açudes a montante possam ser utilizadas nos processos de calibração e validação.

Uma aplicação do modelo foi feita na bacia do Rio do Peixe, na qual, assim como em muitas bacias da região nordeste do Brasil, se dispõe de relativamente poucas informações sobre vazões escoadas. Esta bacia apresenta uma densidade relativamente alta de açudes de porte médio que modificam o escoamento. Trabalhos recentes de consultoria para a elaboração do plano diretor da bacia do Rio do Peixe (SEPLAN, 1996) têm por exemplo, descartado as observações do posto Antenor Navarro por ele se encontrar próximo do açude Pilões, e outros relativos a estudos no rio Piranhas-Açu (SCIENTEC, 1998), têm também descartado as observações do posto Aparecida no período entre 1987 a 1989 por este ser muito influenciado pelo açude Lagoa do Arroz devendo então, neste último caso, abrir mão da calibração do modelo utilizado (modelo concentrado) em outra bacia hidrográfica da região. O AÇUMOD apresentou resultados muito bons com ambos estes postos. No caso da validação com as observações mensais feitas no posto de Antenor Navarro, apenas sete açudes importantes, do ponto de vista estratégico para o uso da água, existiam, enquanto no período correspondente às observações do posto Aparecida, vinte e um açudes estavam operando. Apresentou-se também neste trabalho resultados relativos a uma comparação das vazões diárias simuladas e observadas. Os resultados foram surpreendentemente bons, já que calibração e validação do modelo foram efetuadas sobre observações mensais. Estes resultados levam a crer

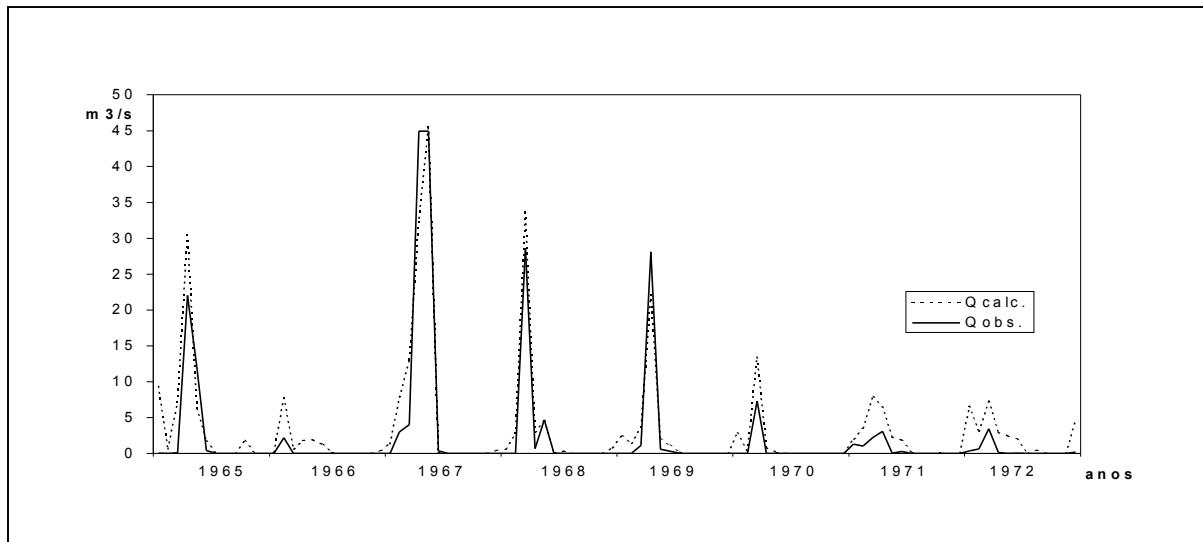


Figura 11. Comparação entre vazões diárias observadas e calculadas.

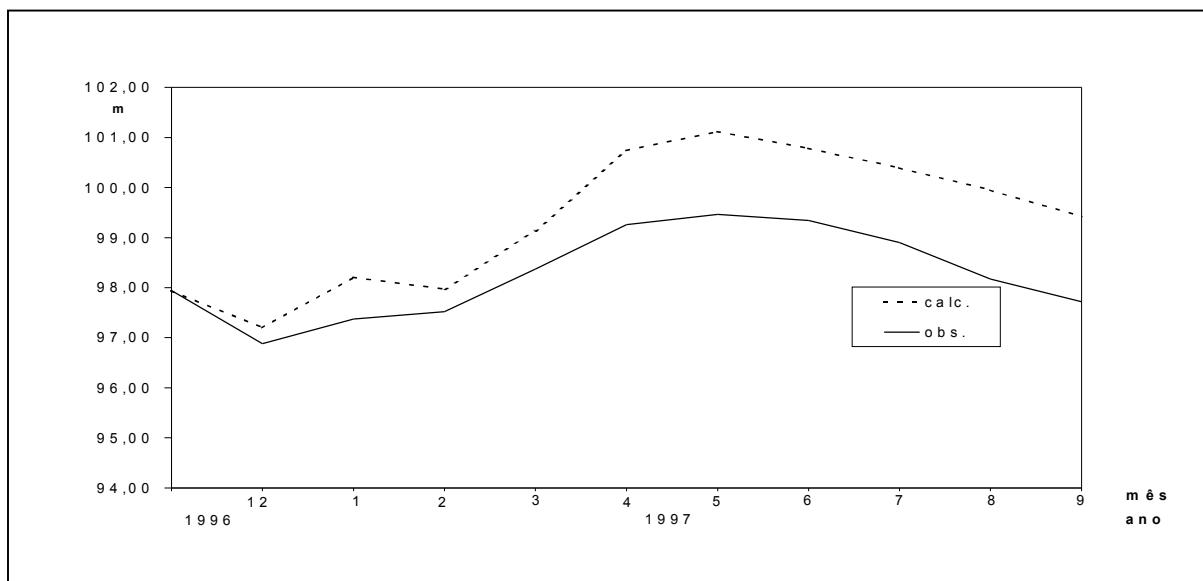


Figura 12. Níveis de água observados e calculados para o açude Lagoa do Arroz.

que o modelo poderá, num futuro próximo, ser utilizado para testar efeitos de certas ações antrópicas como desmatamento ou modificação da cobertura vegetal sobre riscos de inundação ou outros efeitos associados aos escoamentos superficiais. Os resultados de níveis de açudes simulados pelo modelo que puderam ser comparados com valores observados não foram satisfatórios. Identifica-se como possibilidade de erro a variabilidade espacial da precipitação na bacia hidrográfica do açude Lagoa do Arroz que no caso não pôde ser introduzida com os dados utilizados para a formação do polígono de Thiessen.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à ORSTOM na pessoa do Dr. Pierre Chevalier pelo fornecimento das fontes dos programas utilizados pelo SIMMQE e à Secretaria Nacional de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal nas pessoas dos Dr. Herbert Eugênio de Araújo Cardoso e Devanir Garcia dos Santos, que tem financiado este trabalho.

REFERÊNCIAS

- BEVEN, K. J. e I. D. MOORE (1994) "Terrain Analysis and distributed modelling in hydrology - Advances in Hydrological Processes." J. Wiley Ed., 249p.
- DINIZ, L. da S. (1994) "Calibração automática de modelos chuva-vazão usando um algoritmo genético." Dissertação de mestrado; Universidade Federal da Paraíba, 130p.
- DNAEE (1983) "Modelo SIMMQE - Conceituação" Ministério das Minas e Energia - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, 87p.
- GOULA BI TIÉ, A. (1993) "Modélisation hydrologique de bassins versants équipés d'ouvrages hydrauliques en zone Soudano-Sahélienne: Application au Massili (Burkina Faso)" Tese de Doutorado; Ecole des Mines de Paris, 178p.
- MOLLE, F. (1994) "Marcos Históricos e Reflexões sobre a Açudagem e seu Aproveitamento" Série Hidrologia/30; SUDENE – ORSTON, 193p.
- MONTENEGRO, J. P. B. (1990) "Caracterização hidrológica da infiltração e do escoamento superficial em uma micro-parcela sem vegetação do Cariri" Tese de mestrado; Universidade Federal da Paraíba, 139p.
- PASSERAT DE SILANS, A. M. B., FILGUEIRA, H. J. A., FREIRE, P. K. C. e TORRES F. de F. (1998) "Quantificação das demandas hídricas mensais para irrigação visando o planejamento" Anais; IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, CD-ROM.
- SCIENTEC (1998) *Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte "Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu no Território Paraibano - Estudos Fluviométricos e geração de vazões"* Vol. 3, 21p.
- SEPLAN (1996) *Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe "Estudos de base"* Secretaria de Planejamento do Governo do Estado da Paraíba, convênio SEPLAN/SCIENTEC, Vol. 1 e 2.
- SEPLAN (1997) *Plano Diretor dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba "Fase Diagnóstico – Cadastro de Açudes"* Secretaria de Planejamento do Governo do Estado da Paraíba, convênio SEPLAN/SCIENTEC.
- SUDENE (1984) "Dados Climatológicos do Nordeste" Recife, 56p.
- TUCCI, C. E. M. (1998) "Modelos Hidrológicos" Editora da ABRH, 669p.
- VILLELA, S. M. e MATTOS, A. (1975) "Hidrologia Aplicada" Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 245p.

Application of the Hydrological Distributed Model AÇUMOD to the Rio do Peixe Basin in the State of Paraíba

ABSTRACT

The planning and management of water resources in Northeast Brazil requires information about water potential and water availability in "açudes" and other points of interest points such as water supply intakes. This information is supplied by running hydrological models of the catchment. In this paper we describe "AÇUMOD", a distributed hydrological model specifically designed for the Northeastern semi-arid region of Brazil. The model is applied to the Rio do Peixe basin in the state of Paraíba. The results are very good and it is shown that using this model, more information can be used for the calibration process because the water balance of the lakes is obtained while computing flow generation.