MODELAGEM HIDROLÓGICA DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIAUITINGA UTILIZANDO O MODELO SMAP

Rogério M. Chagas[1]; André Schardong[2]; Carlos Eduardo da S. Araújo[3]; Milena P. Fontes[4]; Felipe M. Sobral[5]; José de O. Melo Neto[6]; Danielle Suzane da S. Pinto[7]; Antônio Jorge V. Garcia[8] & Arisvaldo V. Méllo Jr[9].

RESUMO --- No presente trabalho foi feita uma modelagem hidrológica utilizando o modelo chuva-vazão SMAP, e uma análise da distribuição de probabilidade de Gumbel para estimar as vazões máximas e mínimas anuais na sub-bacia hidrográfica do Rio Piauitinga. Os valores de precipitação e vazão mensais, de 1990 a 2006, foram obtidos das estações pluviométrica (1137017) e fluviométrica (50230000) da Agência Nacional de Águas, localizadas no município de Estância, no Estado de Sergipe. Os valores dos parâmetros R^2 (0,7315), *EPE* (2,31) e *EMQP* (2,51) demonstraram um bom ajuste entre os valores de vazões calculados pelo SMAP e os valores observados, entretanto os valores observados foram subestimados. Os parâmetros de calibração (*Str*, *Pes*, *Crec*, *Ecoef* e *Kkt*) apresentaram os seguintes valores: 5232,04 mm; 2,19; 2,38%; 2,2 mm e 0,6 mês^{-1}, respectivamente. O teste de Qui-Quadrado (χ^2) foi utilizado para verificar a aderência da distribuição de probabilidade aos dados observados e apresentou nível de confiança acima de 95% para as séries observadas e para as vazões mínimas calculadas pelo modelo. A série de vazões máximas apresentou um nível de confiança de 90%. As vazões máximas e mínimas calculadas pelo modelo foram 25,4 e 3,1 m^{3}s^{-1}, apresentando uma recorrência de 49,3 e 60,8 anos, respectivamente.

ABSTRACT --- This study applied a model of the type rainfall-runoff called SMAP in the Piautinga River basin. The critical maximum and minimum flows were analyzed using the Gumbel probability distribution. The values of monthly rainfall and flows (from 1990 to 2006) were obtained from the rain gage (1137017) and stream gage (50230000) of the National Water Agency, located in the municipality of Estância in the state of Sergipe. The parameters R^2 (0.73), EPE (2.31) and EMQP (2.51) showed a good fitting between the values calculated by SMAP and the observed values, although the values have been underestimated. The parameters of calibration (*Str*, *Pes*, *Crec*, *Ecoef*, *Kkt*) showed the following values: 5232.04 mm, 2.19, 2.38%, 2.2 mm and 0.6 monthe^{-1} respectively. The chi-square test (χ^2) was used to verify the fit of the probability distribution of the observed data. The confidence level was above 95% for the observed series and the minimum flow calculated by model. The series of maximum flow showed a confidence level of 90%. The maximum and minimum flow calculated by model were 25.4 and 3.1 m^{3}s^{-1}, showing a recurrence of 49.3 and 60.8 years respectively.

[1]MSc. Eng. Agrônomo, Laboratório de Análise de Sistemas de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, UFS, Rua São Cristóvão 461, Centro, Aracaju SE, CEP 49.010-380, Tel:(79)3221-5227, rmoreirachagas@yahoo.com.br
[2]Doutorando em Engenharia de Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da EPUSP, LabSid-EPUSP, Av. Professor Almeida Prado, 83, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil, (11) 30915403, E-mail: andreschardong@gmail.com
[3]MSc. Eng. de Minas, Laboratório de Análise de Sistemas de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, UFS, Av. Adélia Franco, 1122, Luzia, ap. 1103, Aracaju SE, CEP 49.048-010, Tel:(79) 88542643, cesaraujo@gmail.com
[4]Graduada em Saneamento Ambiental, Graduanda em Geologia, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)3222-4901, milageologia@yahoo.com.br
[5]Graduando em Eng. Florestal, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)9975-7775, felipemsobral@yahoo.com.br.
[6]Graduando em Eng. Florestal, UFS, Rua Maria Souza Rosa 91, Conj. Bugio, Aracaju/SE, CEP 49090-180, Tel.(79)3252-4354, joseneto_86@hotmail.com
[7]Graduanda em Geologia, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)9925-8630, danisuzane@hotmail.com
[8]Prof. Dr. Núcleo de Geologia, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)3246-1810, garciageo@hotmail.com
[9]Prof. Dr. Departamento Eng. Agronômica, UFS, Av. Marechal Rondon, sn, Jardim Rosa Elze, 49000-100, Tel.(79)2105-6566, arimellojr@gmail.com

Palavras-chave: modelagem hidrológica, SMAP, previsão de vazões.

INTRODUÇÃO

O estabelecimento de diretrizes e limites no âmbito dos recursos hídricos é fundamental para garantia de uma exploração do recurso estabelecida nas bases do desenvolvimento sustentável. O monitoramento das variáveis hidrológicas, a avaliação do estado atual e de cenários preditivos, compõem as ferramentas para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

Os modelos matemáticos que simulam processos hidrológicos se constituem em ferramentas indispensáveis de previsão e análise quando se deseja garantir um uso sustentável dos recursos hídricos no médio e no longo prazo, auxiliando na identificação de estratégias que harmonizem a vocação dos ecossistemas com sistemas de ocupação nas áreas de bacias hidrográficas, viabilizando assim um modelo diferenciado de ocupação dessas áreas no qual o respeito às questões ambientais seja prioridade.

O SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo hidrológico chuva-vazão, determinístico e conceitual, baseado em parâmetros do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (*Soil Conservation Service*), que a partir da entrada de uma série de valores de precipitação e evapotranspiração (horário, diário ou mensal) determina o escoamento numa determinada área de uma bacia hidrográfica (Lopes *et al*., 1982; Azevedo *et al*., 1993; Castanharo *et al*., 2007; Fádiga Júnior *et al*., 2008).

Os modelos chuva-vazão são de aplicação simples, e de maneira geral utilizados na predição de vazão em cursos d'água utilizando dados climáticos, possibilitando a estimativa indireta da probabilidade de ocorrência de valores de vazão em função de dados históricos que servem como referência para o dimensionamento adequado de obras hidráulicas, implantação de perímetros de irrigação, abastecimento de cidades e indústrias, visando sempre a estimativa do volume adequado de água aos potenciais usuários e beneficiários (Collischonn e Tucci, 2005).

O estudo e a estimativa de eventos hidrológicos extremos, bem como do tempo de recorrência desses eventos, é muito importante no dimensionamento de obras hidráulicas, no planejamento urbano, na delimitação territorial de possíveis áreas de risco de inundações, e, sobretudo, para se correlacionar tais eventos com suas possíveis causas (antrópicas ou naturais) e sua sazonalidade no período de tempo estudado (Abida e Ellouse, 2008; Moretti e Montanari, 2008). Geralmente, os eventos hidrológicos extremos trazem impactos negativos proporcionais à sua magnitude, tais como: inundações de cidades, comprometimento dos serviços básicos de saneamento, perda de plantações agrícolas e perda de vidas humanas (El Adlouni et al., 2008; Twardosz, 2008).

No presente trabalho, o SMAP foi aplicado na sub-bacia hidrográfica do Rio Piauitinga que está localizada na região centro-sul do Estado de Sergipe, e que entre os meses de abril e maio de

2009 apresentou valores de vazões elevados devido às chuvas intensas ao longo do seu curso, causando inundações em áreas urbanas e rurais, isolando comunidades ribeirinhas, comprometendo serviços de esgotamento sanitário e drenagem dos municípios, prejudicando a colheita de produtos agrícolas e provocando a morte de algumas pessoas.

A sub-bacia hidrográfica do Rio Piauitinga é uma unidade de planejamento que compõe a bacia hidrográfica do Rio Piauí, segunda maior bacia em área do Estado, com aproximadamente 4140 km² (Sergipe, 2004). É uma bacia hidrográfica estratégica para o Estado por que tanto o rio principal, quanto seus principais afluentes são utilizados para o abastecimento de água para uso doméstico, industrial e agrícola.

Os objetivos do presente trabalho foram avaliar a disponibilidade hídrica da sub-bacia hidrográfica do Rio Piauitinga para um período de 17 anos (1990 a 2006) utilizando o modelo chuva-vazão SMAP, e ajustar uma distribuição de probabilidade às séries de vazão para estimativa dos valores máximos e mínimos anuais.

MATERIAL DE MÉTODOS

Área de estudo

Na Figura 1 estão as seis bacias hidrográficas (BHs) do Estado de Sergipe, com destaque para a BH do Rio Piauí (nº 5), onde está localizada a sub-bacia hidrográfica do Rio Piauitinga que compreende áreas dos municípios de Estância, Salgado, Boquim e Lagarto. A sub-bacia do Rio Piauitinga ocupa uma área de 417 km² e o curso do principal rio, o Piauitinga, tem uma extensão de 53 km. As principais nascentes do Rio Piauitinga estão localizadas no povoado Brasília (município de Lagarto) (Oliveira et al., 1995). Ainda na Figura 1, estão em destaque as estações pluviométrica (EP1137017) e fluviométrica (EF50230000) da Agência Nacional de Águas (ANA) das quais foram utilizadas as séries históricas de precipitação e vazão, respectivamente, para simulação hidrológica.

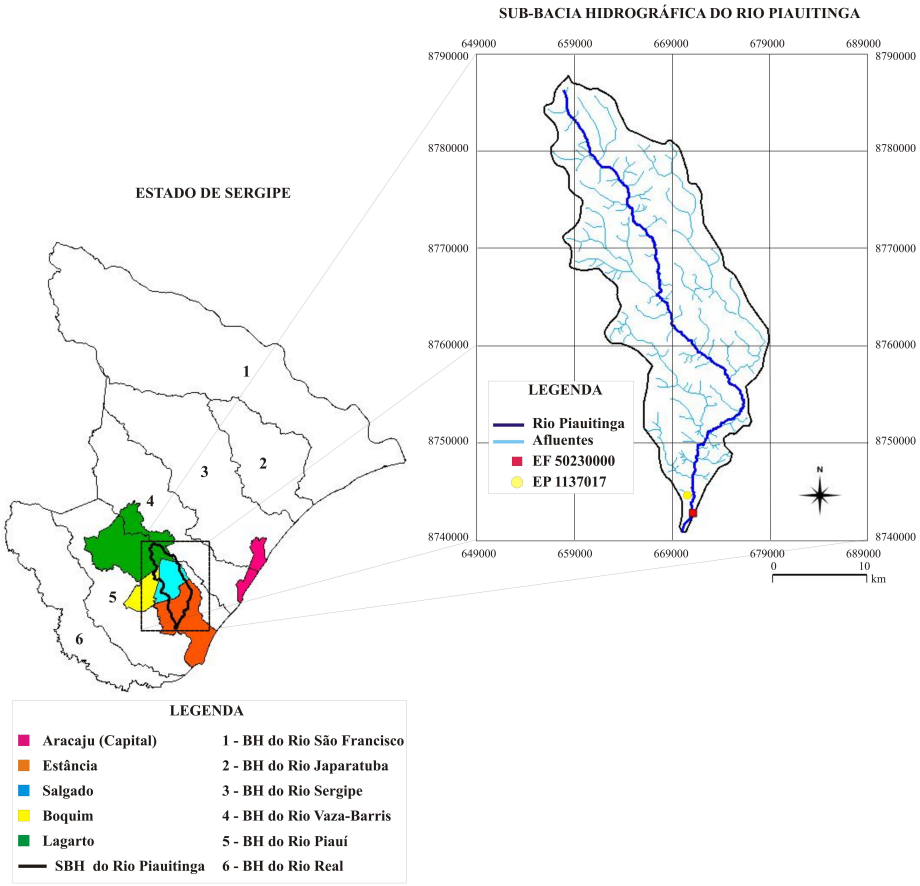

Figura 1 – Mapa do Estado de Sergipe com destaque para sub-bacia do Rio Piauitinga.

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger na região da sub-bacia hidrográfica do Rio Piauitinga há predominância do tipo climático **Aw**, com temperatura média anual variando entre 24,2°C e 25°C, média pluviométrica anual variando entre 1100 mm e 1400 mm, e período chuvoso compreendido entre os meses de março e agosto (Sergipe, 2000).

A geologia da região (Figura 2), formada por uma pequena área do Pré-cambriano e coberta quase totalmente pelas formações mais recentes do Cenozóico, está distribuída por aproximadamente 2,25% de rochas pertencentes ao Embasamento gnáissico do arqueano paleoproterozóico (composto por ortognaisses charnoenderbíticos e charnockíticos, kinzigitos, rochas calcissilicáticas e metanoritos biotita-gnaisses migmatíticos subordinados) e 2,68% de rochas Sedimentares representadas pela Formação Lagarto do mesoproterozóico-neoproterozóico de litotipos (compostos por argilitos, siltitos e arenitos finos intercalados e localmente conglomerados). Ocupando maior área (95,07%) estão as rochas Sedimentares do Grupo Barreiras do Cenozóico composto por areias finas a grossas com níveis argilosos e conglomeráticos (Sergipe, 2004).

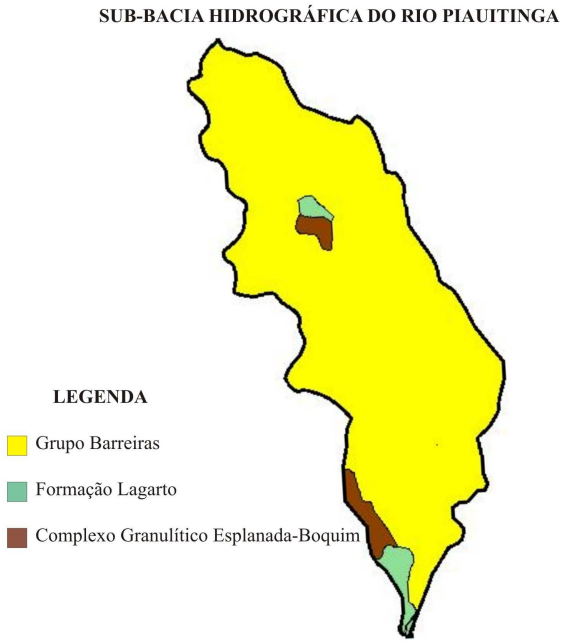

FIGURA 2 - Geologia da sub-bacia do Rio Piauitinga (Sergipe, 2004).

Os tipos de solo que predominam na região (Figura 3a) são: argissolo vermelho amarelo, latossolo amarelo e neossolo flúvico. As principais classes de uso e ocupação do solo (Figura 3b) estão assim distribuídas: pastagens (27,4 %), área cultivada (61,6 %), pequenas áreas ocupadas por matas e florestas (14,0 %) (Sergipe, 2004).

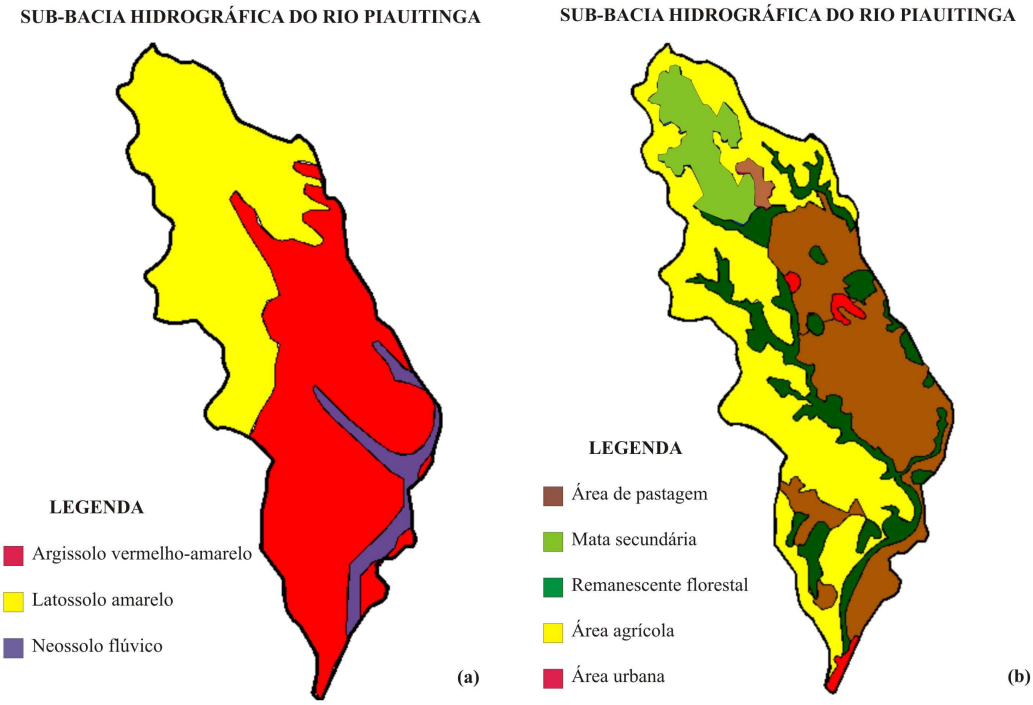

FIGURA 3 - Tipo de solo (a) e classes de uso e ocupação do solo (b) na sub-bacia do Rio Piauitinga (Sergipe, 2004).

O modelo SMAP

O modelo SMAP (versão beta) realiza o balanço da umidade do solo baseado em dois reservatórios lineares que representam a camada superior do solo e o aqüífero (Lopes et al., 1982). As variáveis de estado são atualizadas a cada mês de acordo com as Equações 1 e 2.

$$Rsolo_{(i+1)} = Rsolo_{(i)} + P - Es - Er - Rec \quad (1)$$

$$Rsub_{(i+1)} = Rsub_{(i)} + Rec - Eb \quad (2)$$

em que: *Rsolo* é o reservatório do solo (zona não saturada) em mm; *Rsub* é o reservatório subterrâneo (zona saturada) em mm; *P* é a precipitação (mm); *Es* é o escoamento superficial (mm); *Er* é a evapotranspiração real (mm); *Rec* é a recarga subterrânea (mm); e *Eb* é o escoamento básico (mm).

As funções de transferência são dadas pelas Equações 3, 4, 5, 6 e 7.

$$Es = Tu^{pes} \quad (3)$$

$$Er = Tu * Ep \quad (4)$$

$$Rec = Crec * Tu^{4} \quad (5)$$

$$Eb = (1 - Kk) * Rsub \quad (6)$$

$$Tu = \left(\frac{Rsolo}{Str} \right) \quad (7)$$

em que: *Tu* é o teor de umidade (ad.); *Str* é a capacidade de saturação do solo (mm); *Pes* é o parâmetro de escoamento superficial (ad.); *Ep* é a evapotranspiração potencial (mm); *Crec* é o coeficiente de recarga subterrânea (%); e *Kk* é o constante de recessão (mês^{-1}).

Os parâmetros *Crec* e *Tu* são multiplicados por 100. A constante de recessão *Kk* é determinada por meio da Equação 10 que depende do parâmetro *Kkt* (constante de recessão do escoamento básico) expresso em meses em que a vazão básica cai à metade de seu valor (não considerando recarga nesse período). O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial. A inicialização do modelo é feita com as Equações 8 e 9. Recomenda-se escolher o ano hidrológico da região em estudo e dessa forma, iniciar a calibração pelo mês mais seco, pois nesse período a umidade do solo e a vazão básica estão em seus valores mínimos. A vazão é dada pela Equação 11.

$$Rsolo_{(1)} = Tuin * Str \tag{8}$$

$$Rsub_{(1)} = Ebin * Ad * 2630 / \left(1 - Kk\right) \tag{9}$$

$$Kk = 0,5^{1/Kkt} \tag{10}$$

$$Q = \left(Es + Eb\right) * Ad / 2630 \tag{11}$$

em que: *Tuin* é a umidade inicial do solo (%); *Ebin* é o escoamento básico inicial (mm); e *Ad* é a área de drenagem da bacia (km^2).

Os parâmetros calibráveis no SMAP (versão beta) são: *Str* (capacidade de saturação do solo em mm), *Pes* (parâmetro de escoamento superficial), *Crec* (coeficiente de recarga subterrânea em %), *ECoef* (coeficiente de ajuste da evaporação média), *Kkt* (constante de recessão do escoamento básico) e o *K2t* (constante recessão do escoamento superficial). Esses parâmetros ficam ativos ou não na tela do SMAP de acordo com o período de simulação. Na versão mensal o parâmetro *K2t* não é calibrado.

Cinco funções objetivo estão disponíveis no software SMAP (versão beta) no processo de calibração que avaliam o ajuste entre valores de vazão observados (Q_O) e calculados pelo modelo (Q_{CAL}). Estas funções são descritas em USACE (2000) e Cunderlik e Simonovic (2004) e são: Soma dos Quadrados dos Resíduos - *SQR* (Equação 12), Soma dos Resíduos Absolutos - *SRA* (Equação 13), Erro Médio Quadrático Ponderado - *EMQP* (Equação 14), Erro Percentual dos Valores de Pico - *EPVP* (Equação 16) e Erro Percentual do Volume - *EPV* (Equação 17).

$$SQR = \sum_{t=1}^{N} \left(Q_O\left(t\right) - Q_{CAL}\left(t\right)\right)^2 \tag{12}$$

$$SRA = \sum_{t=1}^{N} \left|Q_O\left(t\right) - Q_{CAL}\left(t\right)\right| \tag{13}$$

$$EMQP = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N} \left(Q_O\left(t\right) - Q_{CAL}\left(t\right)\right)^2 \frac{Q_O\left(t\right) + Q_M}{2Q_M}}{N}} \tag{14}$$

$$EPVP = 100 \left|\frac{Q_O\left(pico\right) - Q_{CAL}\left(pico\right)}{Q_O\left(pico\right)}\right| \tag{15}$$

$$EPVP = 100 \left|\frac{Q_O\left(pico\right) - Q_{CAL}\left(pico\right)}{Q_O\left(pico\right)}\right| \tag{16}$$

$$EPV = 100 \left|\frac{V_O - V_{CAL}}{V_O}\right| \tag{17}$$

em que: Q_O é a vazão observada em m^3s^{-1}; Q_{CAL} é a vazão calculada em m^3s^{-1}; Q_M é a vazão média observada dada pela Equação 18; V_O é o volume observado; V_{CAL} é o volume calculado; (t) é o período de tempo; e (N) é o número de observações.

$$Q_M = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} Q_O(t) \tag{18}$$

Os dados de entrada no SMAP foram as séries históricas de precipitação mensal e vazão mensal, de janeiro de 1990 a dezembro de 2006, das estações pluviométrica (EP1137017) e fluviométrica (EF50230000) da ANA. Ambas as estações estão localizadas no município de Estância, próximas à foz do Rio Piauitinga, conforme mostrado anteriormente na Figura 1.

Os valores da evapotranspiração de referência mensais (*ETo*) foram obtidos dos resultados gerados pelo trabalho de Medeiros e Costa (2004), que utilizaram a média climatológica mensal de temperatura para estimar a *ETo* média mensal para todo o Estado de Sergipe utilizando os parâmetros do método empírico de Thornthwaite (1948).

Parâmetros estatísticos de comparação

Para validação dos dados gerados pelo SMAP foram utilizados o Coeficiente de Determinação da equação de regressão linear (R^2) e o Erro Padrão de Estimativa (*EPE*) (Equação 19).

O Erro Padrão de estimativa (*EPE*) mede a dispersão dos resíduos em torno da reta de regressão, é uma indicação da precisão da estimativa (Naghettini e Pinto, 2007).

$$EPE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_c - Y_i\right)^2}{N-2}\right]^{0,5} \tag{19}$$

em que: Y_i = valor de vazão observado; Y_c = estimativa de Y_i calculada pelo modelo; N = número de observações.

Distribuição de probabilidade de Gumbel

A função de distribuição de probabilidade utilizada no presente trabalho foi descrita em Gumbel (1958), e é dada pela Equação 20:

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}} \tag{20}$$

em que: x = precipitação máxima do período; μ = parâmetro de posição (Equação 21); α = parâmetro de forma (Equação 22).

$$\mu = x_m - 0{,}5772157\alpha \tag{21}$$

em que: x_m = média dos valores máximos da série.

$$\alpha = 0{,}7797\,s \tag{22}$$

em que: s = desvio padrão.

A probabilidade (P) e o período de retorno (T) foram calculados utilizando as Equações 23 e 24:

$$P = 1 - F\left(x\right) \tag{23}$$

$$T = \frac{1}{P} \tag{24}$$

As Equações 25 e 26 foram utilizadas para calcular um valor de vazão (x_T) associada a um período de retorno (T).

$$x_T = \mu + \alpha y_T \tag{25}$$

$$y_T = -ln\left[ln\left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \tag{24}$$

em que: y_T = variável reduzida.

O teste de aderência aplicado para testar o ajuste entre a distribuição de probabilidade de Gumbel e a série de dados observados foi o de Qui-Quadrado (χ^2), dado pela Equação 26. Esse teste é feito baseado no somatório do quadrado dos desvios das freqüências, favorecendo o aspecto cumulativo dos erros (Catalunha, 2002).

$$x^2 = \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{\left(Fo_i - Fe_i\right)^2}{Fe_i} \right) \qquad (26)$$

em que: k = número de classes; Fo_i = freqüência observada; Fe_i = freqüência esperada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 estão os hidrogramas observado (Q_O) e calculado (Q_{CAL}) do Rio Piauitinga para a série de 1990 a 2006. Observa-se que os valores de Q_{CAL} subestimam os valores máximos e mínimos de Q_O na maior parte do período.

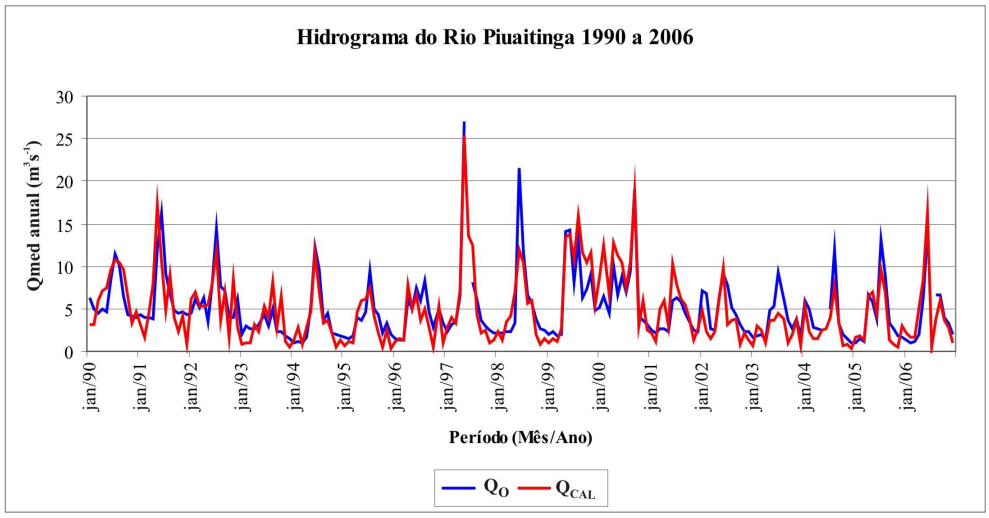

FIGURA 4 - Hidrogramas observado (Q_O) e calculado (Q_{cal}) do Rio Piauitinga para o período de 1990 a 2006.

Na Figura 5 está a reta de regressão linear com respectiva equação e coeficiente de determinação (R^2) para a correlação entre valores de Q_{CAL} e Q_O. O valor do R^2 demonstra um ajuste de aproximadamente 73% entre os valores observados e calculados de vazão.

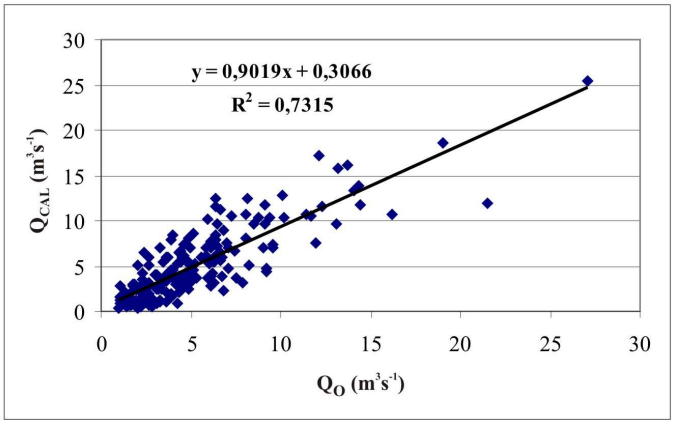

FIGURA 5 - Regressão linear para valores de Qcal e Qo.

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros de calibração do SMAP, assim como os valores de vazões máxima, mínima e média observada (Q_{Omax}; Q_{Omin}; e Q_{Omed}) e calculada (Q_{CALmax}; Q_{CALmin}; e Q_{CALmed}), e também os valores do R^2 e do *EPE*.

Os limites preconizados em Lopes et al. (1982) para simulação mensal para os parâmetros *Str*, *Pes* e *Crec* são: *Str* (400 a 5000), *Pes* (0,1 a 10) e *Crec* (0 a 70). Pela Tabela 1 verifica-se que o valor de *Str* ficou acima do limite superior e os parâmetros *Pes* e *Crec* ficaram dentro dos limites preconizados, mostrando que esses parâmetros responderam satisfatoriamente à calibração automática.

O parâmetro *Ecoef* apresentou boa resposta à calibração automática calibrando com o valor de 2,2055. O parâmetro *Kkt* não apresentou sensibilidade ao processo de calibração automática, sendo então calibrado manualmente e assumindo o valor de 0,6 conforme Tabela 1.

A função objetivo que melhor se ajustou à simulação foi o *EMQP*. Tanto o valor apresentado pelo *EMQP* (2,51), quanto pelo *EPE* (2,31) foram baixos, mostrando que há um bom ajuste entre os valores de Q_O e Q_{CAL}, conforme observado na Tabela 1.

Ainda na Tabela 1, pode ser observado que os valores de Q_{CALmax} (25,39 m^3s^{-1}), Q_{CALmin} (0,35 m^3s^{-1}) e Q_{CALmed} (4,82 m^3s^{-1}) subestimaram os valores de Q_{Omax} (27,08 m^3s^{-1}), Q_{Omin} (0,98 m^3s^{-1}) e Q_{Omed} (4,99 m^3s^{-1}).

Tabela 1 – Parâmetros de calibração e resultados comparativos entre vazões observadas e calculadas.

Simulação SMAP			
Parâmetros de calibração			
Str (mm)	5232,04	**Kkt (mês^{-1})**	0,6
Pes (ad.)	2,19	**Umidade do solo (%)**	70
Crec (%)	2,38	**Fluxo basal (m^3s^{-1})**	0,2
Ecoef (mm)	2,20	**EMQP**	2,51
Resultados comparativos			
Q_{Omax} (m^3s^{-1})	27,08	**Q_{CALmax} (m^3s^{-1})**	25,39
Q_{Omin} (m^3s^{-1})	0,98	**Q_{CALmin} (m^3s^{-1})**	0,35
Q_{Omed} (m^3s^{-1})	4,99	**Q_{CALmed} (m^3s^{-1})**	4,82
R^2	0,7315	**EPE**	2,31

Na Tabela 2 estão os valores da média aritmética (x_m) e do desvio padrão (s), e as equações associando valores de vazão (x_T), parâmetros de posição (μ) e de forma (α) e a variável reduzida (y_T), para as séries de vazões anuais máximas e mínimas. Os valores de x_m e s estão expressos em $m^3s^{-1}ano^{-1}$. Os valores de x_m da série calculada, de máximas e de mínimas vazões, subestimaram os valores observados. Os valores de s, para as séries de máximas, mostram uma variação de 5,588 $m^3s^{-1}ano^{-1}$ e 5,18 $m^3s^{-1}ano^{-1}$ em torno dos valores médios, respectivamente. Os valores de s, para as

séries de mínimas, mostram uma variação de 0,997 $m^3s^{-1}ano^{-1}$ e 0,763 $m^3s^{-1}ano^{-1}$ em torno dos valores médios, respectivamente.

Tabela 2 – Média aritmética, desvio padrão e equações para as séries de vazões máximas e mínimas.

Séries de máximas			**Séries de mínimas**		
$\mathbf{x_m}$	**s**	**Equação**	$\mathbf{x_m}$	**s**	**Equação**
		Vazões observadas			
13,08	5,588	$x_T = 10,56 + 4,36\, y_T$	2,05	0,997	$x_T = 1,6 + 0,78\, y_T$
		Vazões calculadas			
12,02	5,180	$x_T = 9,68 + 4,04\, y_T$	0,98	0,763	$x_T = 0,64 + 0,59\, y_T$

Na Tabela 3 estão os valores de vazões máximas e mínimas (calculadas e observadas) para diferentes períodos de retorno. Pode-se observar que há um melhor ajuste entre os valores de Q_O e Q_{CAL} para as séries de máximas para os diversos períodos de retorno. Contudo, verifica-se que os valores de vazões associados aos períodos de retorno de 100, 150 e 200 anos da série de mínimas calculadas se ajustaram melhor aos valores observados do que os valores da série de máximas calculadas, sendo que ambas as séries calculadas subestimaram os valores de vazões observadas.

Tabela 3 - Valores de vazões máximas e mínimas (Q_O e Q_{CAL}) para diferentes períodos de retorno (T).

Séries de máximas				Séries de mínimas			
Vazões (m^3s^{-1})		Período de retorno (anos)		Vazões (m^3s^{-1})		Período de retorno (anos)	
Q_O	Q_{CAL}	T_{Q_O}	$T_{Q_{CAL}}$	Q_O	Q_{CAL}	T_{Q_O}	$T_{Q_{CAL}}$
4,89	4,41	1,02	1,02	0,98	0,35	1,12	1,25
6,34	7,45	1,08	1,21	1,02	0,38	1,14	1,27
8,26	7,59	1,22	1,23	1,05	0,48	1,15	1,37
9,07	7,79	1,32	1,25	1,07	0,48	1,16	1,37
9,23	8,15	1,34	1,3	1,36	0,49	1,35	1,39
9,51	9,61	1,39	1,56	1,38	0,5	1,36	1,4
11,44	9,7	1,8	1,58	1,43	0,56	1,41	1,47
11,96	10,2	1,94	1,71	1,45	0,62	1,43	1,55
12,29	10,73	2,04	1,86	1,9	0,76	2,04	1,79
13,09	11,61	2,33	2,16	2,1	0,87	2,46	2,03
13,71	11,83	2,6	2,25	2,15	0,89	2,58	2,08
14,31	11,88	2,9	2,27	2,23	0,94	2,79	2,23
14,44	15,84	3	5,1	2,27	0,96	2,9	2,27
16,17	16,18	4,14	5,51	3,1	1,1	7,4	2,73
19,02	17,26	7,5	7	3,47	1,67	11,7	6,46
21,51	18,64	12,8	9,7	3,89	2,5	19,65	23,23
27,08	25,39	44,83	49,33	3,91	3,1	20,12	60,85
30,6	28,26	100		5,19	3,35	100	
32,36	29,88	150		5,5	3,6	150	
33,67	31,09	200		5,73	3,78	200	

Os valores do χ^2 para as vazões observadas foram 0,79 e 4,72, para as séries de máximas e mínimas, respectivamente. E os valores do χ^2 para as vazões calculadas foram 0,04 e 7,45 para as séries de máximas e mínimas, respectivamente. O teste χ^2 apresentou um nível de confiança de 95% para as vazões observadas e para a série de vazão máxima calculada, apresentou um nível de confiança de 90%.

CONCLUSÕES

1. Os resultados encontrados para o R^2 (0,7315), *EPE* (2,31) e *EMQP* (2,51) demonstraram que há um bom ajuste entre os valores de vazões calculados pelo SMAP e os valores observados. Os parâmetros calibrados para a simulação mensal (*Str*, *Pes*, *Crec*, *Ecoef* e *Kkt*) apresentaram os seguintes valores: 5232,04 mm; 2,19; 2,38 %; 2,2 mm e 0,6 $mês^{-1}$, respectivamente;

2. A distribuição de probabilidade de Gumbel ajustou-se aos valores de vazões máximas e mínimas observados e aos valores de vazão mínima calculados pelo modelo com confiança de 95%. O ajuste dos valores de vazão máxima calculados apresentou um ajuste com nível de confiança de 90%;

3. As vazões máximas e mínimas calculadas pelo modelo foram 25,4 e 3,1 m^3s^{-1}, apresentando uma recorrência de 49,3 e 60,8 anos, respectivamente. A análise de eventos extremos de vazões é fundamental para o planejamento de obras relacionadas à exploração dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, como o dimensionamento da rede de abastecimento de água dos municípios, a construção de pontes e diques para proteção contra cheias, a implementação de perímetros irrigados e a geração de energia.

BIBLIOGRAFIA

ABIDA, H; ELLOUZE, M. (2008). *"Probability distribution of flood flows in Tunisia"*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 12, pp. 703–714, 2008.

AZEVEDO, L. G. T.; DARREL, G. F.; PORTO, R. L. L. (1993). *"Expert System for the Calibration of SMAP"*. Water International, v. 18, n. 2, pp. 15-35, 1993.

CASTANHARO, G. (2007). *"Previsão de vazões na bacia do rio Iguaçu baseada no modelo SMAP e com incorporação de informações de precipitação"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, p. 57-68, 2007.

CATALUNHA, M. J. et al. (2002). *"Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no estado de Minas Gerais"*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 10, n. 1, pp. 153-162, 2002.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2005). *"Previsão sazonal de vazão na bacia do Rio Uruguai 1: ajuste e verificação do modelo hidrológico distribuído"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, pp. 60-72, 2005.

CUNDERLIK, J.; SIMONOVIC, S. P. (2004). *"Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model"*. Water Resources Research Report nº. 048, Facility for Intelligent Decision Support, Department of Civil and Environmental Engineering, London, Ontario, Canada, 2004. 113 p.

EL ADLOUNI, S.; BOBE´E, B.; OUARDA, T. B. M. J. (2008). *"On the tails of extreme event distributions in hydrology"*. Journal of Hydrology, 355, pp. 16– 33, 2008.

FADIGA JR, F. M. et al. (2008). *"Modelos de Previsão de Vazões para a Bacia Incremental à UHE Itaipu"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, p. 65-75, 2008.

GUMBEL, E. J. (1958). *Statistics of extremes*. Columbia: Columbia University, 1958. 357 p.

LOPES, J. E. G. et al. (1982). *"SMAP – A simplified hydrological model, applied modelling in catchment hydrology"*. Ed. V.P. Singh, Water Resources Publications, 1982.

MEDEIROS, R. M.; COSTA, O. A. (2004). *"Estimativa da evapotranspiração de referência mensal para os Estado de Sergipe"* in Anais do VI Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica: Diversidades Climáticas, Aracaju, 2004, CD-Rom.

MORETTI, G.; MONTANARI, A. (2008). *"Inferring the flood frequency distribution for an ungauged basin using a spatially distributed rainfall-runoff model"*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 12, pp. 1141–1152, 2008.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

OLIVEIRA, A. P. C.; ALVES, J. P. H.; SANTOS, E. (1995). *"Avaliação da qualidade da água do rio Piauitinga"* in Anais do VII Encontro de química do Nordeste, Teresina, Nov. 1995, 1, pp. 75-75.

SERGIPE (Estado). Superintendência de Recursos Hídricos. (2004). *"Atlas Digital sobre os Recursos Hídricos de Sergipe"*. ARACAJU: SEPLANTEC-SRH, 2004. CD-Rom.

SERGIPE (Estado). Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia. (2000). *"Informes municipais"*. Aracaju: SEPLANTEC, 2000, 75p.

THORNTHWAITE, C. W. (1948). *"An approach toward a rational classification of climate"*. Geographical Review, v. 38, n. 1, pp. 55-94, 1948.

TWARDOSZ, R. (2009). *"Probabilistic model of maximum precipitation depths for Kraków (southern Poland, 1886-2002)"*. Theoretical and Applied Climatology, 2009. (DOI 10.1007/s00704-008-0087-4).

USACE. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000. 149 p.