

Avaliação de séries históricas de vazão monitoradas em duas sub-bacias do Rio Japarutuba em Sergipe com auxílio de algoritmos genéticos





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1678-1961

Dezembro, 2010

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 60

Avaliação de séries históricas de vazão monitoradas em duas sub-bacias do Rio Japaratuba em Sergipe com auxílio de algoritmos genéticos

Marcus Aurélio Soares Cruz

Aracaju, SE
2010

Embrapa Tabuleiros Costeiros

AV. Beira-mar, 3250, Caixa Postal 44, CEP 49001-970, Aracaju, SE

Tel (0**79) 4009-1300

Fax (0**79) 4009-1369

E-mail: sac@cpatc.embrapa.br

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Ronaldo Souza Resende*

Secretária-Executiva: *Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues*

Membros: *Edson Patto Pacheco, Élio César Guzzo, Hymerson Costa Azevedo, Ivênio Rubens de Oliveira, Joézio Luis dos Anjos, Josué Francisco da Silva Junior, Luciana Marques de Carvalho, Semíramis Rabelo Ramalho Ramos e Viviane Talamini.*

Supervisão editorial: *Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues*

Normalização bibliográfica: *Josete Melo Cunha*

Tratamento das ilustrações: *Bryene Santana de Souza Lima*

Foto da capa: *Julio Roberto Araujo de Amorim*

Editoração eletrônica: *Bryene Santana de Souza Lima*

1ª Edição

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Cruz, Marcus Aurélio Soares
Avaliação de séries históricas de vazão monitoradas em duas sub-bacias do Rio Japarutuba em Sergipe com auxílio de algoritmos genéticos / Marcus Aurélio Soares Cruz. - Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2010.
25 p. (Boletim de Pesquisa / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 60).

Disponível em http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2010/bp_60.pdf
1. Água. 2. Bacia hidrográfica. 3. Rio Japarutuba - Sergipe. 4. Geotecnologia. 5. Modelo digital. I. Título. II. Série.

CDD 634.61

©Embrapa 2010

Sumário

Resumo.....	4
Abstract.....	5
Introdução.....	6
Material e Métodos.....	8
Resultados e Discussão.....	12
Conclusões.....	23
Referências.....	24

Avaliação de séries históricas de vazão monitoradas em duas sub-bacias do Rio Japarutuba em Sergipe com auxílio de algoritmos genéticos

Marcus Aurélio Soares Cruz¹

Júlio Roberto Araujo de Amorim²

Ricardo de Aragão³

José Antonio Pacheco de Almeida⁴

Acácia Maria Barros Souza⁵

Jackson Santos de Jesus⁶

Resumo

As bacias hidrográficas no Estado de Sergipe apresentam séries históricas de vazão e precipitação com grande ocorrência de inconsistências e longos períodos de falhas. O estudo selecionou sub-bacias hidrográficas monitoradas na bacia do Rio Japarutuba e ajustou um modelo hidrológico chuva-vazão por meio de algoritmos genéticos, buscando-se analisar o comportamento hidrológico destas bacias e melhorar a qualidade da informação disponível. Os resultados mostram um grande potencial de utilização da ferramenta na interpretação das informações hidrológicas destas bacias e alerta para cuidados no uso das informações atualmente disponíveis.

Plavras-chaves: vazão, modelo hidrológico, bacia do Rio Japarutuba e Sergipe.

¹Engenheiro-civil, D.Sc. em Recursos Hídricos, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE, mascruz@cpatc.embrapa.br.

²Engenheiro-agrônomo, MSc. em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE, jramorim@cpatc.embrapa.br.

³Engenheiro-civil, DSc. em Engenharia, professor da UFS, Aracaju, SE, ricardoaragao@yahoo.com.

⁴Geólogo, DSc. em Geografia e Planejamento, professor da UFS, Aracaju, SE, jalmeida@ufs.br.

⁵Bolsista Fapitec/Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE, acaciaraivel30@hotmail.com.

⁶Bolsista Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE, jackson.geografo.aju@gmail.com.

Evaluation of historical flow data of two sub-basins in the Japaratuba River basin using genetic algorithms

Abstract

The basins of Sergipe state present flow and precipitation time series with inconsistency and long periods of failure. This study selected monitored basins in the Japaratuba River watershed, fitting a hydrological rainfall-runoff model by genetic algorithms procedures, aiming to analyze the hydrology of these basins and improve the quality of available information. The results show a model with great potential to interpretation of hydrologic information in these basins, alerting to the use of information carefully.

Index terms: hydrologic model, Japaratuba River basin, Sergipe

Introdução

A bacia hidrográfica é a unidade elementar para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, conforme preconiza a Lei 9.433 de 1997, que instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos no país. Uma bacia hidrográfica é uma unidade fisiográfica, limitada por divisores topográficos, que recolhe a precipitação, age como um reservatório de água e sedimentos, defluindo-os em uma seção fluvial única, denominada exutório (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Desta forma, a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica conjuga os resultados de um conjunto de processos que ocorrem em seu interior, associados a características como clima, topografia, cobertura vegetal e tipo/uso do solo.

O manejo de bacias hidrográficas pode ser definido como o processo de organizar e orientar o uso da terra e de outros recursos naturais numa bacia hidrográfica, a fim de produzir bens e serviços, sem destruir ou afetar adversamente o solo e a água (BROOKS et al., 1991). Dentro dessa visão, o conhecimento do real comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica mostra-se como pressuposto indispensável para a seleção de estratégias de manejo que permitam a minimização dos impactos ambientais nos recursos hídricos decorrentes das atividades antrópicas desenvolvidas ou com previsão de desenvolvimento.

Os modelos matemáticos de simulação hidrológica têm se mostrado como a melhor alternativa para a avaliação das respostas de bacias hidrográficas segundo cenários de uso do solo submetidas a eventos climáticos. A exata representação do comportamento hidrológico da bacia é impossível de ser obtida, frente a complexidade dos processos envolvidos, no entanto é possível obter através de modelos parcimônicos, respostas médias aos impulsos que permitam a interpretação de tendências, facilitando a tomada de decisão (TUCCI, 1998). O passo primordial para a representatividade das respostas do modelo matemático é a sua calibração, ou seja, a determinação do campo de variação de seus parâmetros de forma a promover o melhor ajuste possível entre a resposta gerada pelo modelo e a resposta da bacia medida em campo. Esse procedimento pode ser realizado de forma empírica, por tentativas, por exemplo, a partir da experiência do usuário ou com auxílio de técnicas de otimização. Dentro das técnicas de otimização relacionadas a modelos hidrológicos, vêm ganhando destaque aquelas que utilizam escolhas aleatórias para se guiarem através do espaço de pesquisa do problema. Os algoritmos genéticos não realizam

“andanças” aleatórias simplesmente, eles usam na pesquisa os conhecimentos obtidos de resultados anteriores e os combina. O resultado conseguido é uma poderosa técnica de pesquisa que pode tratar ruídos, espaços de pesquisas multimodais com relativa eficiência (LOURENÇO, 2003). Os algoritmos genéticos (AG) pertencem à classe de algoritmos que imitam o processo de evolução dos organismos vivos para a pesquisa de soluções para problemas diversos. Houve uma grande evolução neste tipo de algoritmo nos últimos 30 anos. Existem diferentes métodos ou programas de evolução e estão relacionados a objetivos bem específicos, no entanto todos têm um conceito fundamental: a evolução de uma população de indivíduos é simulada em um programa computacional (JOHNSON, 1986). Um algoritmo deste tipo que recentemente vem ganhando bastante espaço em aplicações relacionadas a recursos hídricos é o “Shuffled Complex Evolution” ou SCE-UA (DUAN et al., 1992; DUAN et al., 1994). Este método de otimização global, desenvolvido na Universidade do Arizona tem se mostrado como uma técnica de otimização eficiente e precisa para calibração de modelos simulação em bacias, mostrando grande aplicabilidade e facilidade de lidar com um elevado número de variáveis de busca em espaços de múltiplos pontos de valor mínimo, obtendo sempre ótimos globais (DUAN et al., 1994).

De forma geral, as principais bacias hidrográficas no Estado de Sergipe possuem razoável cobertura por rede de monitoramento, com séries históricas diárias longas (superiores a 30 anos) principalmente de precipitação, no entanto, ao se verificar os dados referentes às vazões (ou níveis), observa-se a ausência de alguns períodos, decorrentes da inexistência ou perda de equipamentos e/ou falta de operação dos equipamentos existentes. Os processos de tomada de decisão quanto à regulação dos usos múltiplos dos recursos hídricos pressupõem um bom conhecimento das séries históricas, uma vez que estas possibilitam a determinação de valores críticos de retirada, disponibilidade hídrica sazonal, vazões máximas para obras de controle e vazões ecológicas para manutenção de ecossistemas, segundo estudos estatísticos.

Buscando contribuir para o entendimento dos processos hidrológicos ocorrentes em bacias sergipanas, o trabalho selecionou duas bacias hidrográficas monitoradas de tamanhos distintos na bacia do Rio Japarutuba, realizando a sua caracterização e calibrando um modelo matemático hidrológico por meio de algoritmos genéticos visando a constituição de séries históricas consistentes de vazão nesses cursos d’água, valorizando a informação disponível e gerando elementos para a avaliação de cenários de manejo do uso do solo nestas bacias.

Material e Métodos

A bacia do Rio Japarutuba apresenta cerca de 1.700 km², representando 7,8% da área do Estado de Sergipe e sendo totalmente contida pelos limites deste. O Rio Japarutuba tem aproximadamente 92 km de extensão, nasce na Serra da Boa Vista, na divisa entre os municípios de Feira Nova e Gracho Cardoso, e deságua no Oceano Atlântico, no Município de Pirambu (JICA/SEPLANTEC, 2000). Essa importante bacia localiza-se entre os paralelos 10°13' e 10°47' de latitude sul e os meridianos 36°49' e 37°19' de longitude oeste. Segundo a classificação climática de Köppen, há a predominância do clima tropical com estação seca de verão (As), com período chuvoso compreendido entre abril e agosto, concentrado nos meses de maio, junho e julho. A precipitação pluviométrica na bacia apresenta valores anuais médios de 1.270 mm, com cerca de 900 mm/ano na sua porção noroeste e 1.500 mm/ano junto à sua foz.

O desenvolvimento do estudo deu-se por meio das seguintes etapas:

1. Levantamento de dados sobre séries históricas: as séries históricas disponíveis foram obtidas a partir de consultas às estações pluviométricas/pluviográficas e linimétricas/linigráficas mantidas pela Agência Nacional de Águas, disponibilizadas em seu portal HidroWeb. Os dados referentes à localização geográfica das estações, lâminas precipitadas e vazões de escoamento dos cursos d'água serão agrupados em banco de dados formato DBF, de forma a permitir a manipulação em um SIG, por meio do programa ArcView®. Foram selecionadas duas bacias hidrográficas correspondentes a áreas contribuintes às estações de nomes Japarutuba e Fazenda Pão de Açúcar na bacia do Rio Japarutuba.

2. Análise exploratória das séries históricas obtidas: as séries de precipitação e vazão levantadas na atividade anterior foram submetidas a uma análise exploratória, com fins de verificação da consistência dos dados bem como da avaliação dos períodos de lacunas que existam, principalmente nos dados de vazão. Foi realizada análise estatística de rotina, com a determinação de parâmetros estatísticos de tendência central e dispersão e plotagem de gráficos de dispersão. Para fins comparativos com os produtos finais do estudo, foram ajustadas distribuições estatísticas aos dados de vazão originais, selecionando aquelas que melhor representem o comportamento dos dados. Foram

selecionadas as distribuições de Gumbel e Weibull (TUCCI, 1993). Além destas, foram produzidas as curvas de permanência das vazões nos dois postos. Destes ajustes estatísticos foram selecionados índices na forma de vazões críticas que auxiliem na tomada de decisão quanto aos usos múltiplos dos recursos hídricos nas bacias. Os índices avaliados foram: $Q_{7,10}$ – vazão mínima com duração de 7 dias e período de retorno de 10 anos; Q_{med} – vazão média de longo período; Q_{50} – vazão com 50% de permanência na série; Q_{90} – vazão com 90% de permanência na série; Q_{95} – vazão com 95% de permanência na série; Q_{2TR} – vazão máxima com 2 anos de tempo de retorno; Q_{10TR} – vazão máxima com 10 anos de tempo de retorno; Q_{100TR} – vazão máxima com 100 anos de tempo de retorno. Essas vazões de referência foram selecionadas por serem utilizadas frequentemente nos processos brasileiros de gestão dos recursos hídricos, envolvendo vazões ecológicas, limites de outorga, disponibilidade hídrica, regularização de vazões e delimitação de faixas de domínio para cheias.

3. Caracterização das bacias hidrográficas: a partir de imagens de satélite LANDSAT TM e CBERS, foi realizada a classificação de uso do solo nas bacias selecionadas, através de técnicas de processamento de imagens utilizando o software Spring. Foi realizada também uma classificação dos tipos de solo nas bacias, a partir do mapa de solos disponível para o Estado de Sergipe elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) (SERGIPE, 2004). Os parâmetros fisiográficos das bacias, como área contribuinte, cotas altimétricas máximas e mínimas, comprimentos de cursos d'água e declividades médias foram obtidos do Modelo Digital de Elevação gerado a partir de dados SRTM. Foram realizadas visitas de campo para a aferição das informações produzidas. As informações obtidas nesta atividade, permitiram o estabelecimento dos limites de variação para os parâmetros do modelo hidrológico calibrado na atividade seguinte.

4. Calibração do modelo hidrológico IPHS1: o IPHS1 (TUCCI et al., 1987) constitui-se em um sistema modular de simulação hidrológica-hidráulica que permite a simulação tanto de eventos quanto de séries históricas. Este modelo é gratuito e de uso livre. Neste estudo foram utilizados os seguintes sub-módulos constituintes do módulo IPH2:

4.1. Distribuição espacial da precipitação média: utiliza o método dos polígonos de Thiessen, gerados a partir da técnica de Voronoi disponível no ArcView®.

4.2. Perdas por evaporação e interceptação: determina os volumes retirados da precipitação por interceptação da cobertura vegetal e por evaporação das superfícies. Inicialmente dos volumes interceptados e posteriormente do solo. Baseia-se em uma relação linear entre a evaporação real/evaporação potencial e a relação água no solo e capacidade máxima de armazenamento da água no solo.

4.3. Separação do escoamento: utiliza o algoritmo de Horton & Bertelot (TUCCI, 1993).

4.4. Escoamento superficial: algoritmo de Clark, composto pelo histograma tempo-área (HTA) para o processo de translação do escoamento e pelo reservatório linear simples para representação do amortecimento (PORTO, 1995). O histograma tempo-área pode ser obtido com base nas isócronas de tempos de resposta da bacia ao seu exutório.

4.5. Escoamento subterrâneo: reservatório linear simples adaptado (TUCCI, 1993).

Os parâmetros ajustados no processo de calibração foram:

- R_{max} – representa as perdas iniciais.

- l_0 , l_b e h – parâmetros da separação do escoamento, onde l_0 e h representam a capacidade máxima de armazenamento da água no solo e l_b a capacidade máxima de percolação.

- K_s e t_c – parâmetros para a propagação superficial, onde K_s representa o tempo de retardo do escoamento e t_c , ou tempo de concentração é o tempo máximo de resposta da bacia e define o HTA.

- K_{sub} – parâmetro para o escoamento subterrâneo, sendo o tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo.

- Alfa – parâmetro de adaptação para simulação de séries longas.

A maioria dos parâmetros possui um campo de variação já conhecido, resultado de inúmeras aplicações em estudos de casos no Brasil, análises de sensibilidade e decorrentes também dos próprios limites de validade dos algoritmos. O

processo de calibração automática utilizou o algoritmo SCE-UA (DUAN et al., 1992; DUAN et al., 1994). Este algoritmo de Evolução dos Complexos Misturados, baseia-se em algoritmos genéticos e tem se mostrado eficiente na calibração de modelos hidrológicos aplicados em bacias brasileiras. Maiores detalhes sobre o algoritmo podem ser obtidos em Diniz (1999) e Collishonn (2001). A função objetivo que apresentou melhores resultados foi a minimização do coeficiente de Nash-Sutcliffe (BRAVO et al., 2006):

$$F.O. = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_c)^2}{(Q_o - Q_m)^2}$$

Onde: Q_o é a vazão observada em cada intervalo de tempo i ; Q_c é a vazão calculada pelo modelo e Q_m é a vazão média observada de toda a série histórica.

No processo de calibração do modelo utilizou-se a seleção de períodos consecutivos de dados sem falhas, de forma a representar estágios diferentes de uso e ocupação do solo na bacia. Assim, segundo recomendações da literatura relacionada ao modelo, os períodos tiveram 3 anos consecutivos como duração mínima para calibração, sendo utilizados períodos maiores quando possível.

5. Verificação da calibração do modelo: uma vez calibrado o modelo aos dados das séries históricas selecionadas, foram utilizados períodos mínimos de um ano para a verificação dos ajustes. Estes períodos selecionados não foram utilizados no processo de calibração por otimização. Nesta seleção foram utilizados períodos próximos aos utilizados na calibração, buscando limitar a aplicação a um intervalo máximo de 5 anos, para evitar alterações significativas no uso do solo e mudanças de clima.

6. Geração de novas séries de dados históricos de vazão: uma vez ajustado modelo e verificado o seu ajuste, foram produzidas novas séries históricas para as duas bacias a partir dos dados de precipitação disponíveis, constituindo um novo banco de dados.

7. Ajustes de distribuições estatísticas aos dados finais: foram realizados ajustes das mesmas distribuições estatísticas utilizadas na segunda etapa, bem como obtidas as novas curvas de permanência de vazões a partir das novas séries históricas simuladas e comparados os valores dos oito índices selecionados.

Resultados e Discussão

O monitoramento atual de vazões na bacia se dá em cinco estações, das quais foram selecionadas duas, de forma a cobrir escalas diferentes de trabalho. O primeiro foi o posto fluviométrico denominado Japarutubasob o código 50040000, localizado no município de mesmo nome, nas coordenadas $36^{\circ}57'W$ e $10^{\circ}35'S$, com área de contribuição de 750 km^2 . A série histórica disponível inicia em 1969, totalizando 40 anos de registros, com falhas em alguns anos. O segundo posto, denominado, Fazenda Pão de Açúcar, possui código 50042000, e localiza-se nas coordenadas $36^{\circ}56'W$ e $10^{\circ}27'S$, no município de Muribeca, apresentando área de contribuição de aproximadamente 140 km^2 , com série iniciando em 1973 e duração de 37 anos. Ambos os postos são mantidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), que disponibiliza os dados diários em seu portal HidroWeb (AGÊNCIA..., 2009). A Figura 1 apresenta as bacias selecionadas e a localização dos postos, descritos na Tabela 1. Observa-se que para o posto Japarutuba, a série histórica de vazões disponível apresenta 8,5% de falhas e para o posto Fazenda. Pão de Açúcar, que possui série mais curta, as falhas correspondem a 12% de toda série.

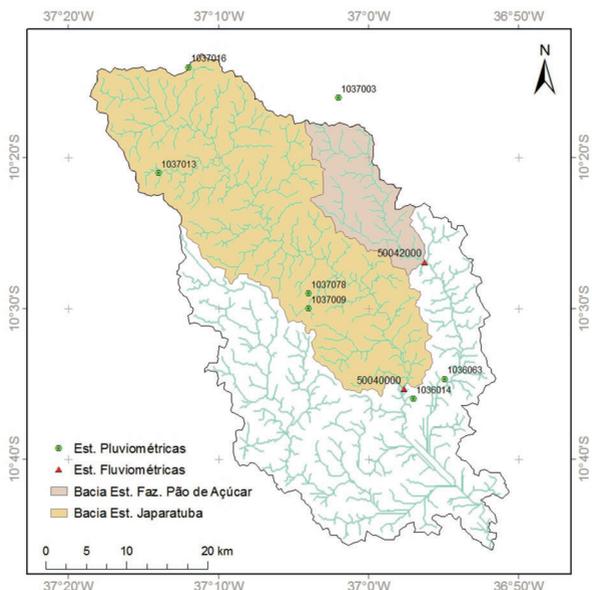


Figura 1. Bacias contribuintes aos postos fluviométricos e estações pluviométricas selecionados na bacia do Rio Japarutuba.

Tabela 1. Descrição dos postos selecionados para análise das séries históricas na bacia do Rio Japarutuba.

Estação	Código	Latitude (S)	Longitude (W)	Área (km ²)	Registros diários			
					Início	Total	Falhas	
Japarutuba	50040000	10° 35'	36° 57'	750	Jan/69	14610	1235	8,5%
Faz. Pão de Açúcar	50042000	10° 26'	36° 56'	140	Jun/73	13149	1579	12,0%

As estações pluviométricas foram selecionadas a partir da extensão, confiabilidade das séries disponíveis, proximidade às bacias selecionadas e cobertura dos períodos de vazões existentes nos postos. Assim, das quinze estações (AGÊNCIA..., 2009) localizadas na bacia do Rio Japarutuba ou próximo desta, restaram sete, que estão apresentadas na Figura 1 e descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Estações pluviométricas selecionadas na bacia do Rio Japarutuba ou proximidades.

Nome	Posto	Latitude (S)	Longitude (W)	Períodos	Média Anual (mm)
Japarutuba	1036014	10° 36'	36° 57'	1969 - 1985	1270,9
Faz. Cajueiro	1036063	10° 35'	36° 55'	1992 - 2007	1404,0
Aquidabã	1037003	10° 16'	37° 02'	1973 - 1984	919,8
Capela	1037009	10° 30'	37° 04'	1969-1987/1991/1994/1996-1998	1300,6
Cumbe	1037013	10° 21'	37° 14'	1969 - 1987	797,8
Gracho Cardoso	1037016	10° 14'	37° 12'	1969-1987/1991/1994/1996-1999	790,5
Capela II	1037078	10° 29'	37° 04'	1983 - 2007	1229,9

Tendo em vista que as séries de precipitação não cobrem de forma uniforme os períodos de simulação, foi necessária a seleção de postos com dados em períodos comuns, para fins de determinação da precipitação média diária sobre cada bacia por meio dos Polígonos de Thiessen.

A partir dos valores de vazões consistidos, foram ajustadas distribuições estatísticas e obtida a curva de permanência para os postos, com fins de produzir os índices de referência. A Figura 2 apresenta o ajuste da distribuição de Weibull às vazões mínimas de sete dias de duração para os postos fluviométricos avaliados.

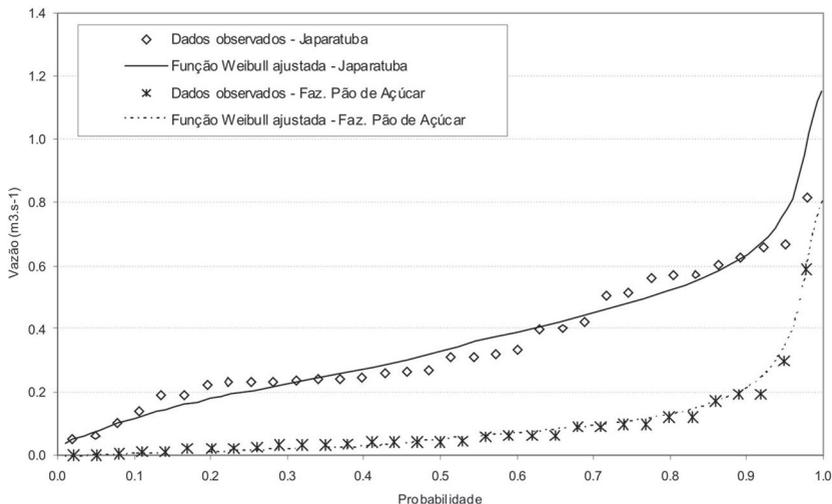


Figura 2. Ajustes da distribuição de probabilidade de Weibull aos dados observados para os postos nas sub-bacias Japarutuba e Fazenda Pão de Açúcar na bacia do Rio Japarutuba em Sergipe.

Observa-se uma boa aderência aos dados, que foi refletida no teste de Kolmogorov-Sminov. A função ajustada permitiu a obtenção do valor de referência $Q_{7,10'}$, que ficou em $0,12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para a estação Japarutuba e $0,01 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para a estação Fazenda Pão de Açúcar. Percebe-se que são valores extremamente baixos, e que a utilização deste valor de vazão de referência deve ser evitado em projetos nestas bacias.

A curva de permanência (Figura 3) produzida para ambos os postos proporcionou a obtenção de dos valores de vazões de referência $Q_{50'}$, Q_{90} e Q_{95} . Para o posto Japarutuba, estes valores foram $1,19 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, $0,34 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $0,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ respectivamente. Já para o posto Fazenda Pão de Açúcar, os valores foram $0,20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, $0,05 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $0,03 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Esses valores, apesar de superarem os valores obtidos para $Q_{7,10'}$ em comparação, por exemplo com a Q_{95} , ainda demonstram a baixa disponibilidade hídrica dessas bacias.

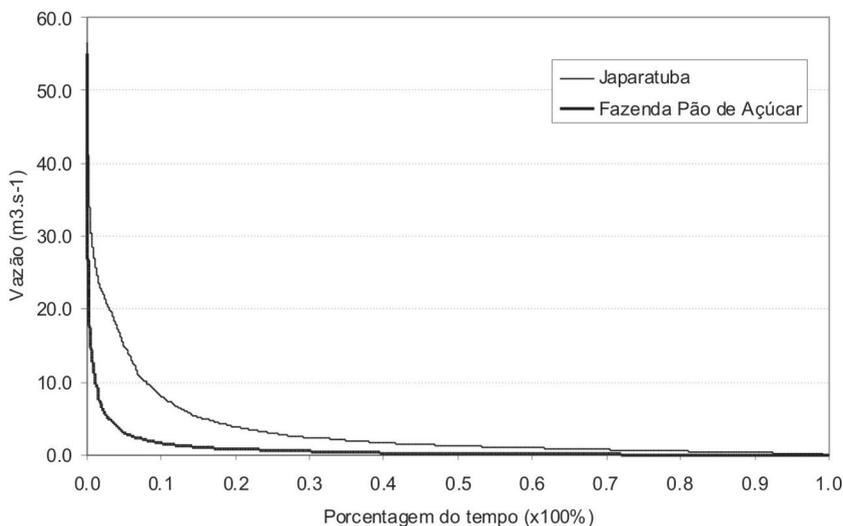


Figura 3. Curvas de permanência de vazões diárias para os postos nas sub-bacias Japaratuba e Fazenda Pão de Açúcar na bacia do Rio Japaratuba em Sergipe.

O ajuste da função de probabilidade de Gumbel apresentou melhor aderência aos dados de vazões máximas em ambos os postos avaliados, conforme pode ser observado na Figura 4. A partir dessa função, foram obtidas as vazões de projeto seguintes: Q_{2TR} , Q_{10TR} e Q_{100TR} . Os valores obtidos foram para o posto Japaratuba $27,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $49,87 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $64,66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ respectivamente, enquanto que para Fazenda Pão de Açúcar, $16,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $38,10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $60,90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

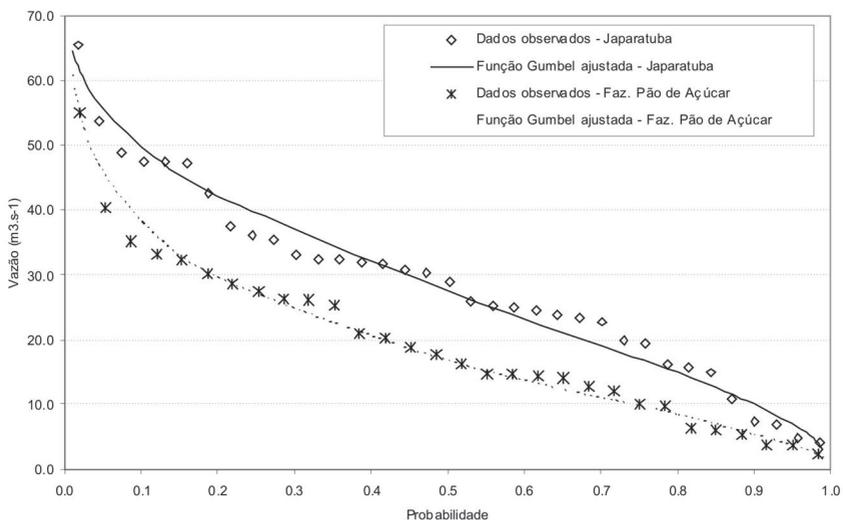


Figura 4. Ajustes da distribuição de probabilidade de Gumbel aos dados observados para os postos nas sub-bacias Japarutuba e Fazenda Pão de Açúcar na bacia do Rio Japarutuba, Sergipe.

A caracterização física das bacias fez uso de um modelo digital do terreno obtido a partir de uma cena SRTM, com resolução 90 m. A partir deste MDT foram gerados parâmetros para entrada no modelo de simulação, com áreas contribuintes, declividades, comprimentos de bacia e desníveis. A Figura 5 apresenta o MDT para as duas bacias estudadas.

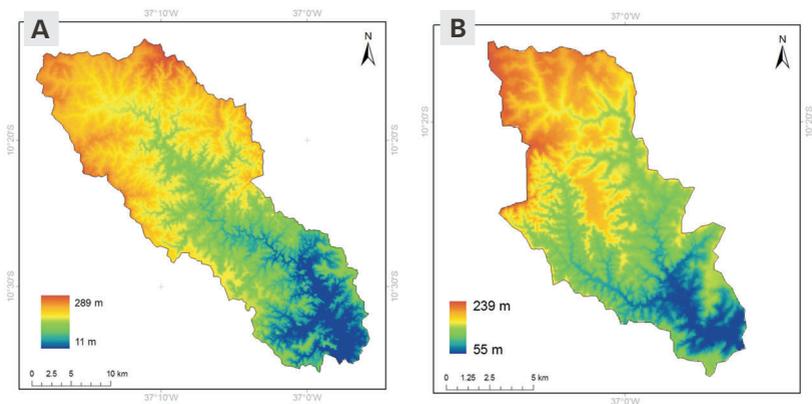


Figura 5. Modelo digital do terreno para as sub-bacias (a) Japarutuba e (b) Fazenda Pão de Açúcar na bacia do Rio Japarutuba, Sergipe.

A classificação de uso do solo nas bacias foi realizada por meio de imagens de satélites LANDSAT 5TM e CBERS 2B. As imagens CBERS obtidas para a bacia não apresentaram bons resultados no processo de classificação, uma vez que apresentavam ruídos excessivos em suas respostas radiométricas, impedindo uma classificação uniforme na cena. Assim, optou-se pelo uso de imagens LANDSAT 5 TM para uma classificação supervisionada, com apoio na visualização das imagens CBERS 2B. Dessa forma foram utilizadas as cenas LANDSAT 5 TM, órbita 215, ponto 67, com data de passagem de 03-04-2009. Na Figura 6 são apresentadas as classes de uso e cobertura obtidas, descritas quantitativamente na Tabela 3.

Observa-se pela Tabela 3, que há em ambas as bacias a predominância das classes pastagens e cultivos agrícolas sobre as demais, ilustrando bem o processo de desenvolvimento agropecuário verificado nesta região. As áreas de mata e matas ciliares correspondem cerca de 13,5% na sub-bacia do JAPARATUBA e 17,3% na sub-bacia do posto Fazenda Pão de Açúcar, este último ainda com boa cobertura, mas com tendência a substituição por atividades agropecuárias. A presença de nuvens foi bastante significativa, principalmente na sub-bacia Japarutuba, implicando também na elevada presença de sombras. Ressalte-se que esse processo de caracterização das bacias foi validado por meio de cinco visitas de campo com registros fotográficos e coleta de pontos com GPS.

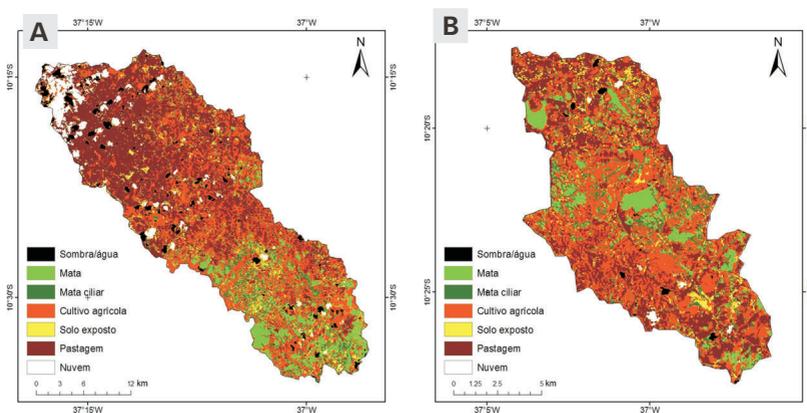
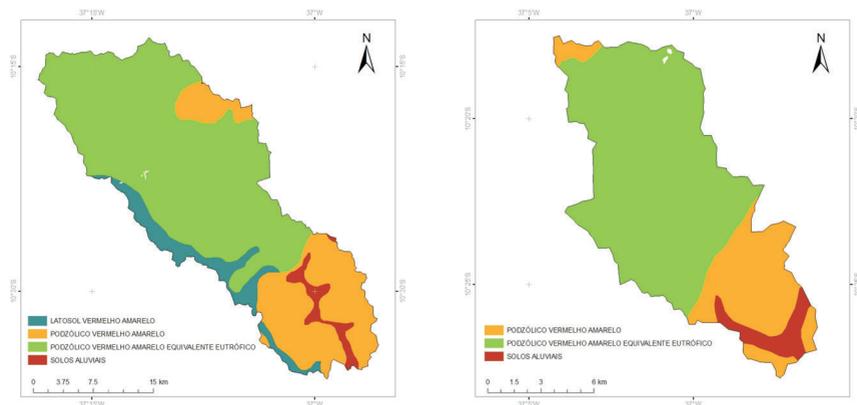


Figura 6. Classificação supervisionada do uso e cobertura do solo nas sub-bacias (a) Japarutuba e (b) Fazenda Pão de Açúcar, na bacia do Rio Japarutuba, Sergipe.

Tabela 3. Porcentagens de classes de usos e cobertura do solo nas bacias selecionadas.

Nome	Sombra/água	Mata	Mata ciliar	Cultivo agrícola	Solo exposto	Pastagem	Falhas	Nuvem
Japarutuba	3.7%	6.0%	7.5%	29.6%	5.9%	42.0%	1235	5.2%
Faz. Pão de Açúcar	0.9%	7.8%	10.5%	41.2%	6.3%	32.7%	1579	0.6%

A classificação dos tipos de solos predominantes em cada bacia foi realizada a partir do mapa de solos para o Estado de Sergipe (SERGIPE, 2004). A classificação dos solos predominantes nas bacias pode ser visualizada na Figura 7 (a) e (b). Observa-se uma predominância dos solos Podzólicos Vermelho Amarelo e associações. Os solos Podzólicos Vermelho Amarelo distrófico (PvD) são constituídos basicamente por argilas de baixa atividade, são solos profundos a muito profundos e têm acidez de moderada a forte, com baixa fertilidade natural. Já os solos eutróficos (PE) constituídos por argilas de baixa atividade, são solos de fertilidade natural variando de média a alta, no entanto tem como fator limitante ao uso agrícola a deficiência de água, são denominados também Alissolos.

**Figura 7.** Classificação dos tipos de solo predominantes nas sub-bacias (a) Japarutuba e (b) Fazenda Pão de Açúcar, na bacia do Rio Japarutuba, Sergipe. Adaptado de (SERGIPE, 2004).

A partir das informações obtidas no processo de caracterização física e climática das bacias, foi iniciado o processo de calibração do modelo hidrológico IPHS1, em seu módulo IPH2. Os dados de entrada foram área contribuinte, tempo de concentração, condições iniciais, dados brutos de precipitação, vazão e estimativa da evapotranspiração, para o qual se utilizou dados de temperatura média mensal pelo método de Blaney-Criddle (TUCCI, 1993). Além destas informações, foram estimados os intervalos de variação dos parâmetros do modelo segundo os tipos de solo e coberturas predominantes. Os períodos selecionados para o processo de calibração são apresentados na Tabela 4, bem como os valores dos parâmetros ajustados a partir do Algoritmo SCE-UA, supondo 40 indivíduos por complexo e 900 gerações. A Figura 8 apresenta alguns hidrogramas dos períodos ajustados.

Observa-se que o modelo teve bastante dificuldade para representar as vazões máximas, o que pode ser justificado pela baixa qualidade dos dados de vazão em ambos os postos, reflexo de seções transversais de fundo móvel, que promovem mudanças constantes nas relações entre nível e vazão, muitas vezes não cobertas adequadamente pela curva-chave utilizada na conversão. Também deve-se ressaltar a carência de dados de precipitação em número maior de postos para todos os períodos utilizados na calibração. Assim, buscou-se auxiliar o processo de otimização com uso da curva de permanência de vazões, de forma a manter o regime hidrológico no período simulado, selecionando dentre as alternativas ótimas possíveis, o hidrograma simulado que promovesse o mínimo de alteração em três vazões de referência: Q_{90} , Q_{50} e Q_5 .

Tabela 4. Parâmetros do modelo IPH2 ajustados para os postos selecionados por meio do algoritmo SCE-UA com seleção de alternativas apoiada na curva de permanência.

Estação	Período	l_0	l_b	h	K_s	K_{sub}	R_{max}	Alfa	Coef.	NS
Japarutuba	1969 - 1977	27,88	0,85	0,07	10,00	50,00	9,00	19,02	0,19	
	1981 - 1983	62,48	0,51	0,01	9,98	82,89	8,99	20,00	0,26	
	1985 - 1987	52,00	0,31	0,02	9,95	82,00	9,55	20,00	0,28	
	1990 - 1993	45,13	0,56	0,77	10,00	82,32	9,00	10,73	0,31	
	2002 - 2005	41,96	0,26	0,62	10,00	80,00	2,90	19,99	0,02	
Fazenda Pão de Açúcar	1975 - 1981	53,32	0,58	0,81	1,94	12,58	0,00	8,67	0,63	
	1988 - 1990	20,01	2,00	0,95	3,00	250,00	9,00	0,00	0,81	
	1992 - 1997	51,80	0,25	0,70	3,93	500,00	9,00	20,00	0,47	
	2000 - 2005	15,00	0,98	0,54	2,34	20,00	9,00	20,00	0,38	

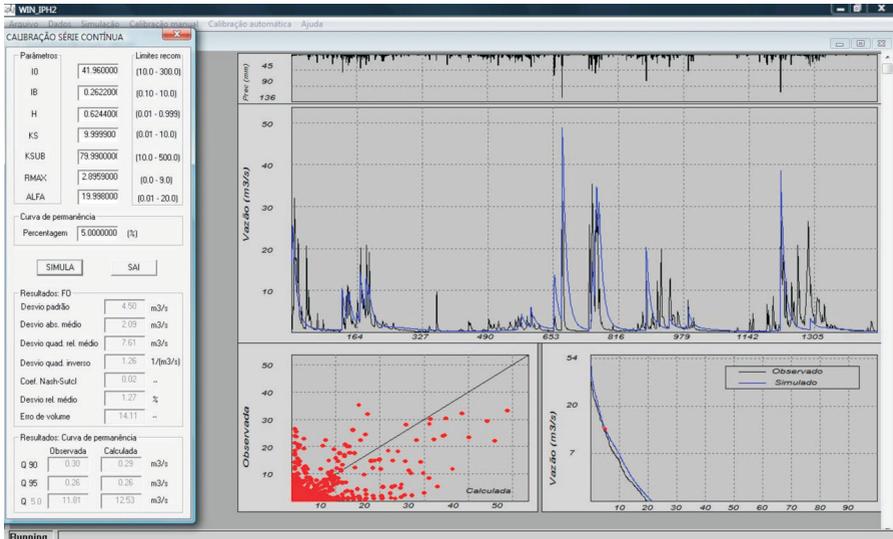


Figura 8. Tela do módulo IPH2 apresentando exemplo dos hidrogramas ajustados por meio do algoritmo SCE-UA de otimização para o posto Japarutuba, na bacia do Rio Japarutuba, Sergipe.

A verificação dos ajustes realizados deu-se a partir da seleção de períodos próximos ao utilizado no ajuste que não possuísem falhas. Este procedimento apontou para a dimensão do erro na estimativa de vazões observadas a partir da informação de precipitação. Os erros médios situaram-se entre 8% para vazões mínimas (considerando aquelas menores que o primeiro quartil das séries), 12% para vazões médias (vazões situadas entre o primeiro quartil e o terceiro quartil das séries) e 19% para vazões máximas (vazões maiores que o terceiro quartil das séries), para o posto Japarutuba e 7%, 13% e 23% para o posto Fazenda Pão de Açúcar, respectivamente.

Uma vez ajustado o modelo para diferentes períodos e avaliada a incerteza envolvida na verificação, foi realizado o preenchimento das falhas nas séries históricas. Este preenchimento foi realizado dando entrada no modelo os valores dos parâmetros ajustados do período de calibração mais próximo, bem como considerando dados de chuva com durações superiores ao período de preenchimento, como forma de “aquecer” o modelo. A Figura 9 apresenta o resultado do processo de preenchimento de falhas para o período de 1993 a 1995 no posto Japarutuba.

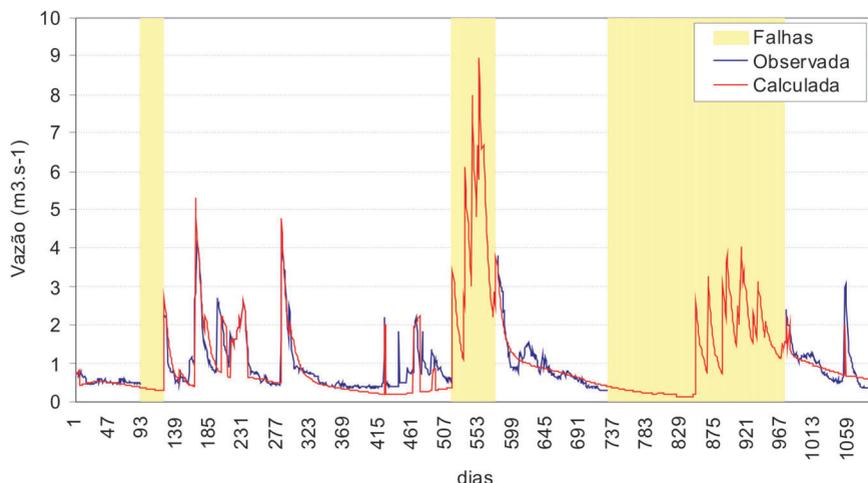


Figura 9. Preenchimento de falhas no período de 1993 a 1995 no posto Japarutuba, na bacia do Rio Japarutuba, Sergipe.

Após o preenchimento das falhas na série histórica de ambos os postos, foram ajustadas as distribuições estatísticas e produzidas as curvas de permanência para as novas séries, compostas por dados observados e dados simulados. As mesmas vazões de referência foram obtidas e comparadas com os valores calculados a partir dos dados brutos, adicionando ainda a vazão média de longo período (Q_m). A Tabela 5 apresenta as vazões obtidas e a sua comparação com as originais.

Tabela 5. Comparação entre vazões de referência para séries históricas com e sem falhas para as bacias estudadas.

Nome	Série	Falhas (%)	$Q_{7,10}$	Q_m	Q_{50}	Q_{90}	Q_{95}	Q_{2TR}	Q_{10TR}	Q_{100TR}
Sub-bacia Fazenda Pão de Açúcar	original	12,0	0,01	0,77	0,20	0,05	0,03	16,80	38,10	60,90
	preenchida	0,0	0,01	0,75	0,21	0,05	0,03	15,15	37,17	62,34
	Diferença	0%	-3%	5%	0%	0%	-10%	-2%	2%	
Sub-bacia Japarutuba	original	8,5	0,12	3,15	1,19	0,34	0,25	27,46	49,87	64,66
	preenchida	0,0	0,09	3,09	1,16	0,31	0,22	25,98	49,53	67,29
	Diferença	-25%	-2%	-3%	-9%	-12%	-5%	-1%	4%	

Observa-se pelos resultados apresentados que há grande variabilidade entre vazões de referência relacionadas às mínimas, médias e máximas e ainda entre as duas sub-bacias. Considerando as vazões mínimas, verifica-se que $Q_{7,10'}$, Q_{90} e Q_{95} não apresentaram diferenças entre as duas séries para a sub-bacia Fazenda Pão de Açúcar, no entanto apresentam mudanças significativas para Japarutuba, 25% de redução na $Q_{7,10'}$, 9% de redução na Q_{90} e 12% na Q_{95} . Tal fato pode estar relacionado à diferença de escala entre as sub-bacias, uma vez que o erro na calibração também foi maior para a bacia maior. Para vazões médias, como representam Q_m e $Q_{50'}$, observam-se erros da mesma ordem de grandeza para ambas as bacias, apenas com mudança na Q_{50} do posto Faz. Pão de Açúcar, que aumentou o valor. No entanto a grandeza das alterações situa-se dentro da faixa dos erros cometidos na calibração. Considerando vazões máximas, verifica-se que as vazões de referência Q_{2TR} e $Q_{10TR'}$ tiveram seus valores reduzidos quando a série foi preenchida, com valor significativo para Q_{2TR} no posto Fazenda Pão de Açúcar. Para $Q_{100TR'}$ observou-se comportamento inverso, com aumento no valor. Esta faixa de valores é especialmente crítica, pois o modelo não obteve ajustes ideais para todos os períodos, retratados nos altos valores de erros médios obtidos nos períodos de calibração.

Apesar da baixa qualidade dos dados brutos obtidos, entende-se que o modelo superou as expectativas na capacidade de ajustar os hidrogramas calculados aos observados, mostrando o grande potencial de aplicação do algoritmo SCE-UA na calibração de modelos hidrológicos. As diferenças observadas nas vazões de referência, principalmente na sub-bacia do posto Japarutuba, alertam para a necessidade de monitoramento realizado com maior acurácia e análises de consistência que considerem as alterações freqüentes das seções transversais em rios de leito móvel como se verifica na bacia do Japarutuba.

Conclusões

1. O modelo IPHS1 associado ao algoritmo de calibração SCE-UA apresenta grande potencial na representação do comportamento hidrológico de bacias no Estado de Sergipe.
2. A caracterização das bacias dos postos Japarutuba e Fazenda Pão de Açúcar na bacia do Rio Japarutuba por meio de geotecnologias mostrou-se eficiente.
3. O modelo apresenta dificuldades de representação das vazões máximas.
4. De forma geral a qualidade dos dados disponíveis (precipitação e vazão) é baixa.
5. As vazões de referência selecionadas mostram grande variabilidade de comportamento entre as séries históricas originais e com falhas preenchidas, principalmente para a bacia do posto Japarutuba.
6. As vazões de referência para mínimas: $Q_{7,10}$ e Q_{95} , apresentam diferenças da ordem de 25% e 12%, entre as séries, respectivamente, para o posto Japarutuba.
7. Para o posto Fazenda Pão de Açúcar, a maior diferença média ocorre para a vazão de referência Q_{2TR} com o valor de 10%.
8. Os resultados apontam para a necessidade de implantação de redes de monitoramento de longo período e análise de consistência que considere a variabilidade de leituras móveis.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (Brasil). Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 03 jan. 2009.

BROOKS, K. N.; P. F. FOLLIOT; H. M. GREGERSEN et al. **Hydrology and the Management of Watersheds**. Iowa: Iowa State University Press, 1991. 391p.

DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, n. 4. p 1015-1031. April, 1992.

DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 158, p. 265-284. January, 1994.

JICA. SEPLANTEC. Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia. **Estudo sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos no Estado de Sergipe na República Federativa do Brasil**. Aracaju, 2000.

JOHNSON, L. E. Water resource management decision support systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 112, n. 3, p. 308-325, July, 1986.

KIRKMAN, T. W. **Statistics to Use**. 1996. Disponível em: <<http://www.physics.csbsju.edu/stats/KS-test.html>>. Acesso em: 14 out. 2009.

LANNA, A. E. Elementos de estatística e probabilidade. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH; UFRGS, 1993. p. 79-176.

LOURENÇO, C. E. B. **Algoritmos genéticos**. Curso de Ciência da Computação. Rio Claro: U-NESP, 2003. Disponível em: <<http://black.rc.unesp.br>>. Acesso em: 6 de set. 2003.

NAGHETTINI, M. C.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 561 p. v. 1.

PANTALEÃO, S. M. **Impacto genotóxico de poluentes químicos presentes na água e sedimentos do rio Japaratuba**. 2006. 107 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Genética e Bioquímica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

PORTO, R. Escoamento Superficial Direto. Em: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. de; BARROS, M. T. (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH; UFRGS, 1995. 428 p. c. 4, p. 107- 165.

ROCHA, J. C. S.; CORREIA, C. O.; ROCHA, C. L. Bacia hidrográfica do rio Japaratuba: uma visão da gestão de recursos hídricos frente ao uso e ocupação da terra. In: ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE, 2., 2009, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009.

SERGIPE. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. **Centro de Meteorologia da SEMARH/SRH**. Disponível em: "<<http://www.semarh.se.gov.br/meteorologia/>>". Acesso em: 05 jan. 2009."

SERGIPE. Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia. Superintendência de Recursos Hídricos. **Atlas digital sobre recursos hídricos**. Aracaju: SEPLANTEC/SRH, 2004. 1 CD-ROM.

TUCCI, C. E. M.. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH;Edusp, 1998. 670 p.

TUCCI, C. E. M. Vazão máxima e hidrograma de projeto. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH;Edusp, 1993. p. 391-441.

TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E. A.; PASINATO, H. D. Sistema de simulação precipitação-vazão IPHS1. In: RECURSOS Hídricos.. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 1987. (Publicação 20).

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH; UFRGS, 1993. 946 p.



Tabuleiros Costeiros

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

