

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO IPH II A PARTIR DO FRACIONAMENTO DA SÉRIE DE VAZÕES EM GRUPOS

Carlo Lucca Coutinho Ungaretti Rossi¹ & Juan Martín Bravo².

RESUMO – A calibração pode ser entendida como o processo de busca dos valores ótimos dos parâmetros de modelos hidrológicos. Dessa forma, a calibração é um processo de otimização no qual as variáveis de decisão são os parâmetros do modelo hidrológico e as restrições estão relacionadas à validade física do valor do parâmetro ou do processo que eles intervêm. Portanto, o desempenho da calibração é essencial para a validação de um modelo. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo verificar como são influenciados os valores das funções-objetivo por erros em vazões baixas, médias e altas na calibração do modelo IPH II. Assim, o IPH II foi aplicado na bacia do rio Tesouras, em Goiás, e calibrado com o algoritmo evolucionário mono-objetivo SCE-UA. O método utilizado consiste em avaliar a eficiência da calibração do modelo a partir da separação da série de vazões em grupos e estudar individualmente os erros inerentes a estes grupos e sua contribuição no valor de funções-objetivo. O resultado obtido a partir da aplicação deste método, para o caso estudado, mostrou-se vantajoso em relação a avaliação visual e da avaliação da função-objetivo por apresentar mais detalhes sobre a magnitude dos erros e sua localização na série de vazões calculadas.

ABSTRACT– The calibration can be understood as the process of searching for the optimal values of the parameters of the hydrological model. Thus, calibration is an optimization process in which the decision variables are the parameters of the hydrological model and the constraints are related to the physical validity of the value of the parameter or process that they intervene. Therefore, calibration's performance is essential for the validation of a model. On this context, this project aimed to study how the objective-functions are influenced by errors in low, medium and high flows on the calibration of IPH II model. Thus, the IPH II was applied in the Tesouras river basin, in Goiás, and calibrated with the evolutionary mono-objective algorithm SCE-UA. The method consists on evaluating the efficiency of the calibration of the model by separating the flow series into groups and individually study the errors inherent to these groups. The result obtained from the application of this method, for the case studied, has shown an advantage when compared to the visual evaluation and the evaluation of the objective function by presenting more details about the magnitude of the errors and its location in the series of calculated flows.

Palavras-Chave – IPH II, algoritmo evolucionário mono-objetivo, calibração automática.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos que simulam a transformação da chuva em vazão são ferramentas que representam, de forma simplificada, os diversos processos do ciclo hidrológico que interagem em

1) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Bolsista do CNPq – Brasil. E-mail: rossi.carlolucca@gmail.com

2) Professor adjunto do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: jumabra@iph.ufrgs.br

uma bacia hidrográfica. Esses modelos são baseados em equações matemáticas que possuem parâmetros que caracterizam o comportamento hidrológico de bacia (Tucci, 1998 apud Bravo *et al.*, 2009). Além de auxiliar a extensão de séries de vazão, os modelos chuva-vazão permitem compreender de forma mais aprofundada o sistema físico, prever vazões em tempo real, dimensionar obras hidráulicas e avaliar os efeitos de modificações no uso dos solos (Collischonn e Tucci, 2001).

Assim, os modelos hidrológicos são ferramentas essenciais no cenário dos recursos hídricos. Diversos modelos foram criados em função da importância deste recurso, como o modelo IPH II, o modelo MGB-IPH, o TOPMODEL, dentre outros. Cada modelo possui suas particularidades e deve ser adaptado para a região a qual se deseja aplica-lo. Este processo de adaptação do modelo é denominado de calibração e, segundo Collischonn e Tucci (2001), corresponde a uma das etapas fundamentais da aplicação de um modelo chuva-vazão. A etapa de calibração dos parâmetros do modelo deve ser realizada em uma bacia onde se dispõe de dados de vazão observados. A calibração pode ser realizada manualmente, dependendo diretamente da experiência do usuário, ou de forma automática, através de medidas de desempenho. Dessa forma, a calibração de um modelo deve ser avaliada de forma cautelosa para que este forneça resultados que descrevam de forma satisfatória o comportamento hidrológico em uma bacia. Nesse sentido, no presente artigo tem-se como objetivo verificar como são influenciados os valores das funções-objetivo por erros em vazões baixas, médias e altas na calibração do modelo IPH II utilizando o algoritmo evolucionário mono-objetivo SCE-UA.

2. MODELO IPH II

O modelo IPH II, implementado por Tucci *et al.* (1981, apud Tucci, 2005), utiliza um algoritmo de separação de escoamento desenvolvido por Berthelot (1970, apud Tucci, 2005) em conjunto com algoritmos que equacionam perdas, escoamento superficial e subterrâneo. Trata-se de um modelo que já foi objeto de diversos estudos como os realizados por Germano *et al.* (1998), Collischonn e Tucci (2001 e 2003), Bravo *et al.* (2009) e Paris *et al.* (2011). A última versão deste modelo, segundo Germano *et al.* (1998), foi desenvolvida por Tucci e Campana (1993). O modelo foi desenvolvido para que necessite o menor número de parâmetros possível, podendo ser aplicado em diferentes problemas de recursos hídricos. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados pelo modelo, enquanto a Tabela 2 apresenta os limites de cada um desses parâmetros.

O modelo IPH II é composto por quatro algoritmos: Perdas através da evaporação e transpiração; Separação de escoamentos; Propagação dos escoamentos superficiais e Propagação subterrânea. Os algoritmos que compõe o modelo IPH II são descritos tanto por Tucci (2005) quanto por Germano *et al.* (1998) e, portanto, não serão apresentados no presente artigo.

Tabela 1 - Parâmetros do modelo IPH II (Adaptado de Santos *et al.*, 2001).

Parâmetro (Unidade)	Restrição	Sentido "físico" atribuído
I0 (mm/ Δt)	$I0 > I_b$	Capacidade de infiltração quando o solo está com armazenamento correspondente à capacidade de campo.
Ib (mm/ Δt)	$I_b < I0$	Capacidade de infiltração quando o solo está saturado.
h	$0 < h < 1$	Mede a convexidade da curva de infiltração.
Ks (Δt)	$K_s < K_b$	Tempo médio de esvaziamento do reservatório do escoamento superficial.
Kb (Δt)	$K_b > K_s$	Tempo médio de esvaziamento do reservatório do escoamento subterrâneo.
Rmax (mm)	$R_{max} > 0$	Capacidade máxima do reservatório de interceptação.
α	$0 < \alpha < 20$	Parâmetro auxiliar

Tabela 2 - Restrições atribuídas aos parâmetros durante a calibração.

Parâmetro (Unidade)	Limite inferior	Limite superior
I0 (mm/ Δt)	10	300
Ib (mm/ Δt)	0,1	10
h	0,01	0,9999
Ks (Δt)	0,01	10
Kb (Δt)	10	500
Rmax (mm)	0	9
α	0,01	20

3. CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Os modelos hidrológicos chuva-vazão permitem a obtenção das vazões que escoam no exutório de uma bacia, durante determinado período de tempo, a partir de dados de chuva e evapotranspiração. Este resultado é obtido a partir de diversos processos hidrológicos descritos na formulação do modelo, que são elaborados de maneira simplificada de forma a depender de um número reduzido de parâmetros. O processo de calibração de um modelo hidrológico consiste na busca de um conjunto de parâmetros que resulte em uma série de vazões calculadas (Q_{calc}) mais próxima possível da série de vazões observadas (Q_{obs}). Os resultados provenientes dos modelos podem ser avaliados de forma qualitativa, correspondente a calibração manual, e de forma quantitativa, utilizando-se uma ou mais funções-objetivo, que corresponde a calibração automática.

A calibração manual consiste na busca de uma boa representação do comportamento hidrológico da bacia a partir de um processo de tentativa e erro, dependendo da experiência do usuário. Essa técnica é um processo iterativo, onde o usuário do modelo altera os valores dos parâmetros em cada simulação e continua até que o usuário decida que o resultado encontrado é satisfatório na comparação entre as vazões calculadas e observadas (Bravo *et al.*, 2009).

De maneira semelhante à alternativa anterior, calibração automática tem como objetivo a busca do conjunto de parâmetros que melhor represente o comportamento hidrológico da bacia, porém com reduzida interferência do usuário. Esta técnica surgiu como alternativa para contornar a falta de usuários experientes, acelerar o processo de calibração e torná-lo menos subjetivo e, portanto, passível de repetição (Collischonn e Tucci, 2001).

4. ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS

Segundo Bravo *et al.* (2009), os algoritmos evolucionários (AE) são técnicas numéricas de otimização e busca inspirados em analogias com a natureza, que geralmente incluem o processo de evolução de seres vivos e o comportamento social de animais e insetos. Desde a década de 1970, quando esta ferramenta surgiu, os algoritmos evolucionários vêm sendo estudados de forma que, nos dias atuais, trata-se de uma das principais ferramentas utilizadas em problemas de otimização.

Os algoritmos evolucionários podem ser de dois tipos: mono-objetivo ou multi-objetivo. Um algoritmo evolucionário mono-objetivo parte de uma população inicial de pontos, aleatoriamente distribuída no espaço de busca, que evolui em direção ao ótimo global através de sucessivas iterações e avaliações de apenas uma função-objetivo (FO). Assim, este tipo de algoritmo busca um único conjunto de parâmetros que otimiza a função-objetivo escolhida. Já um algoritmo evolucionário multi-objetivo parte de uma população inicial de pontos, aleatoriamente distribuída no espaço de busca, e evolui em busca do Frente de Pareto, que corresponde ao melhor conjunto de soluções que satisfazem a otimização de múltiplas funções-objetivo. Portanto, um algoritmo multi-objetivo avalia diversos conjuntos de parâmetros que satisfazem a otimização das funções-objetivo escolhidas.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme mencionado anteriormente, neste artigo, tem-se como objetivo verificar como são influenciados os valores das funções-objetivo por erros em vazões baixas, médias e altas na calibração do modelo IPH II. Para isso, o modelo IPH II foi calibrado com um AE mono-objetivo a partir de três funções-objetivo, sendo que após cada calibração foram estimadas as contribuições dos erros em cada grupo de vazão, no valor total apresentado pela função-objetivo. A seguir são descritas a área de

estudo utilizada, os grupos de vazões definidos, calibração do modelo e a avaliação de desempenho do mesmo.

5.1. Área de estudo

A área utilizada neste estudo corresponde à bacia do rio Tesouras, afluente do rio Araguaia. A bacia deste rio encontra-se no estado de Goiás, em uma região com relevo relativamente ondulado. Essa região pertence à Depressão do Araguaia, sendo as coberturas vegetais predominantes o cerrado e a pastagem (RADAMBRASIL, 1981 apud Bravo *et al.*, 2009). O clima é tropical com duas estações bem definidas: chuvosa, de outubro a março, e seca, de abril a setembro. A precipitação média anual é aproximadamente 1700 mm e a evapotranspiração real estimada, aproximadamente, 1600 mm/ano, tendo o coeficiente de escoamento de longo prazo um valor em torno de 0,35 (Bravo *et al.*, 2009). A climatologia mensal destas variáveis mostra uma clara sazonalidade na precipitação, com precipitações mensais entre 100 mm e 400 mm no período chuvoso (outubro de um ano a abril do ano seguinte), enquanto que evapotranspiração mensal apresenta valores próximos a 100 mm no mesmo período. Os dados de vazão foram obtidos do posto fluviométrico Ponte rio Tesouras (código 25500000), cuja área é de 1817 km². No presente estudo, foram considerados 5 anos de dados (1982 a 1986) com um intervalo de tempo diário.

5.2. Grupos de vazões

A série de vazões do posto fluviométrico Ponte do rio Tesouras foi dividida em quatro grupos, delimitados em função das vazões Q_{10} , Q_{50} e Q_{90} , obtidas a partir da curva de permanência, apresentada na Figura 1. Com isso, os grupos foram divididos da seguinte forma: **Grupo 1 (Vazões mínimas)** - Vazões observadas menores que a Q_{90} ($Q_{obs} < Q_{90}$); **Grupo 2 (Vazões intermediárias I)** - Vazões observadas entre a Q_{90} e a Q_{50} ($Q_{90} \leq Q_{obs} < Q_{50}$); **Grupo 3 (Vazões intermediárias II)** - Vazões observadas entre a Q_{50} e a Q_{10} ($Q_{50} \leq Q_{obs} < Q_{10}$); e **Grupo 4 (Vazões máximas)** - Vazões observadas maiores que Q_{10} ($Q_{obs} \geq Q_{10}$).

5.3. Calibração do modelo

A calibração do modelo IPH II foi realizada utilizando-se uma técnica de calibração mono-objetivo. Esta técnica foi aplicada utilizando-se o algoritmo SCE-UA (“Shuffled Complex Evolution”), descrito por Duan *et al.* (1992) e cujas diretrizes são apresentadas por Duan *et al.* (1994). Este método combina técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização local. O algoritmo SCE-UA opera com uma população de pontos que “evolui” em direção ao ótimo global através de sucessivas iterações e avaliações da função-objetivo.

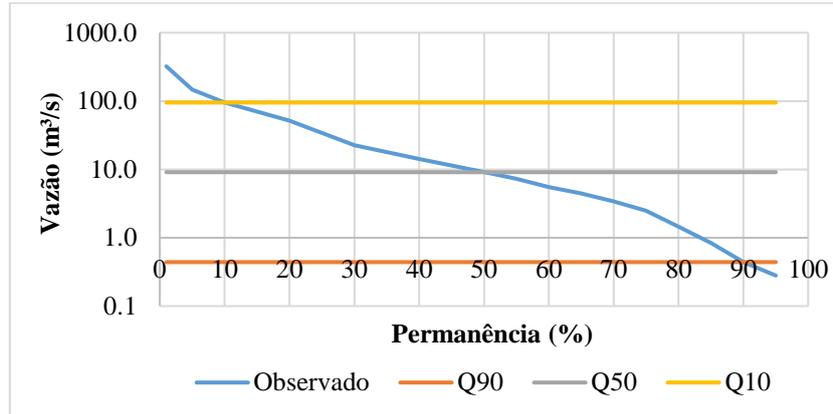


Figura 1 - Curva de permanência das vazões da estação.

Tratando-se de um algoritmo mono-objetivo, o SCE-UA necessita de medidas de desempenho para otimizar. Nesse sentido, foram definidas como função-objetivo para a calibração: erro absoluto médio (F_1 , equação (1)); erro quadrático relativo médio (F_2 , equação (2)) e erro absoluto relativo médio (F_3 , equação (3)).

$$F_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |Q_{obs}(i) - Q_{calc}(i)| \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{obs}(i) - Q_{calc}(i))^2}{Q_{obs}(i)} \quad (2)$$

$$F_3 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|Q_{obs}(i) - Q_{calc}(i)|}{Q_{obs}(i)} \quad (3)$$

onde: n é o número de vazões da série; Q_{obs} corresponde a vazão observada; Q_{calc} corresponde a vazão calculada pelo modelo.

A função F_1 indica a diferença absoluta média entre as vazões calculadas e observadas na série, correspondendo aos valores mais altos dentre as medidas de desempenho estudadas. Já a função F_2 representa a diferença média quadrática entre as vazões calculadas e observadas com relação às vazões observadas. A função F_3 indica a proporção com que a diferença das vazões calculadas e observadas representa em relação as vazões observadas.

5.4. Avaliação do desempenho do modelo

A avaliação do desempenho do modelo foi realizada utilizando-se as mesmas medidas de desempenho escolhidas como função-objetivo para a calibração do modelo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Resultados da calibração e desempenho do modelo

O modelo IPH II foi calibrado a partir das três funções-objetivo escolhidas, gerando três conjuntos de parâmetros, como mostra a Tabela 3. Percebe-se que a calibração por F_1 e F_2 foi muito próxima. As medidas de desempenho obtidas a partir da calibração mono-objetivo do modelo IPH II tendo como funções-objetivo F_1 , F_2 e F_3 são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3 - Parâmetros obtidos a partir da calibração do modelo IPH II pelas funções-objetivo F_1 , F_2 e F_3 .

Parâmetros (Unidade)	Função-objetivo da calibração		
	F_1	F_2	F_3
I_0 (mm/ Δt)	31,11	34,25	35,99
I_b (mm/ Δt)	0,73	0,70	0,46
h	0,92	0,88	0,84
K_s (Δt)	7,08	7,18	10,00
K_b (Δt)	10,00	10,00	10,00
R_{max} (mm)	8,93	8,31	5,08
α	0,54	0,01	0,01

Tabela 4 - Medidas de desempenho otimizadas com calibração do modelo IPH II.

Medida de desempenho	Função-objetivo da calibração		
	F_1	F_2	F_3
F_1	10,91	11,26	13,57
F_2	9,93	6,33	9,22
F_3	1,62	0,70	0,54

Analisando-se visualmente o comportamento dos hidrogramas resultantes de cada uma das calibrações percebe-se que estes hidrogramas subestimam os picos de vazão, mas representam de forma satisfatória os períodos de recessão, conforme apresentado na Figura 2. Esta figura apresenta os hidrogramas calculados em um período de cheia, confirmando que as vazões máximas são subestimadas a partir da calibração com base nas funções-objetivo selecionadas.

6.2. Contribuição dos grupos de vazões para as medidas de desempenho

A Tabela 5 apresenta o erro absoluto médio (F_1), o erro quadrático relativo médio (F_2) e erro absoluto relativo médio (F_3) calculado conforme os grupos de vazões para cada função-objetivo utilizada para calibração. Nesta tabela, para cada função-objetivo das calibrações, a soma dos erros de cada grupo (colunas) resulta nos valores apresentados na Tabela 4. Percebe-se que, em geral, os erros calculados são mais significativos nos grupos correspondendo as maiores vazões, Grupo 3 e 4, indicando que o modelo representa melhor os períodos de recessão que os períodos de cheia. Ressalta-se que o mesmo resultado foi constatado a partir da análise visual, porém sem a mesma precisão.

A divisão da série de vazões por grupos permite uma avaliação mais detalhada do comportamento do modelo como um todo. Após a calibração por cada uma das funções-objetivo,

foram calculados a contribuição percentual dos grupos de vazões para os erros no modelo. Visando generalizar a contribuição de cada um dos grupos, estabeleceram-se os seguintes critérios: **Contribuição Baixa** para grupos com influência no erro total menor do que 30%; **Contribuição Média** para grupos com influência no erro total entre 30% e 60%; e **Contribuição Alta** para grupos com influência no erro total maior do que 60%. A partir dos critérios estabelecidos, foram obtidas as contribuições apresentadas na Tabela 6.

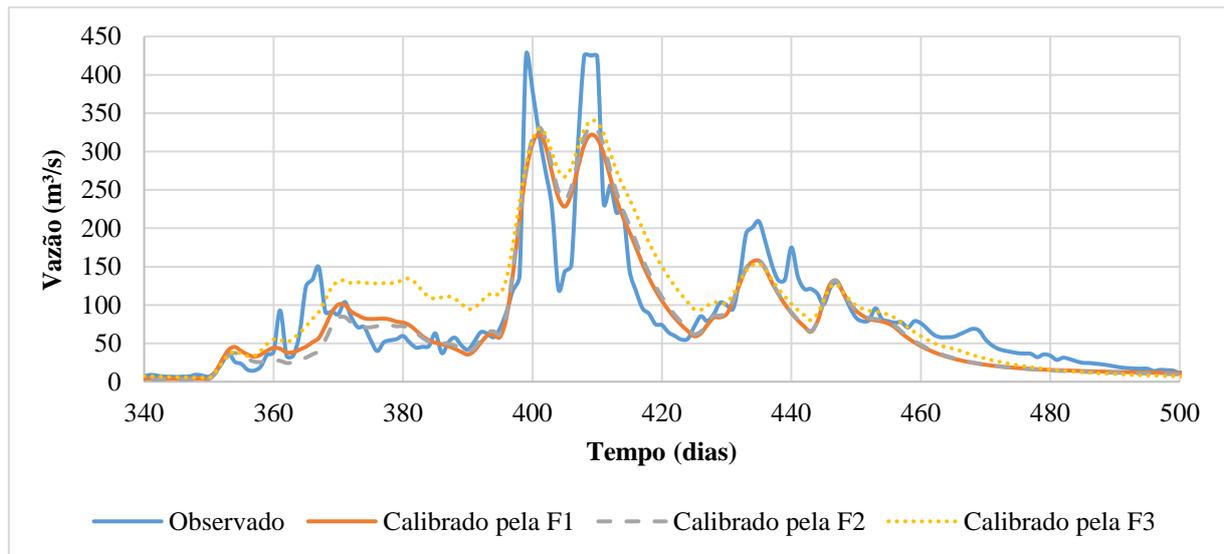


Figura 2 - Comportamento dos hidrogramas calibrados durante um período de cheia.

Tabela 5 - Medidas de desempenho de cada grupo conforme a FO da calibração.

Função-objetivo da calibração	Grupos	Medidas de desempenho		
		F ₁	F ₂	F ₃
F ₁	1 (Vazões mínimas)	0,17	2,92	0,90
	2 (Vazões Intermediárias I)	1,02	2,34	0,55
	3 (Vazões intermediárias II)	4,74	2,59	0,14
	4 (Vazões máximas)	4,99	2,09	0,03
F ₂	1	0,04	0,21	0,22
	2	0,86	0,74	0,29
	3	5,28	3,14	0,16
	4	5,07	2,24	0,03
F ₃	1	0,02	0,04	0,07
	2	0,81	0,61	0,23
	3	7,23	5,86	0,21
	4	5,51	2,71	0,03

O comportamento do **erro absoluto médio** (F₁) se mostrou constante para todas as calibrações, indicando um erro maior para os grupos de vazões mais altas. No **erro quadrático relativo médio** (F₂) o comportamento obtido foi diferente para todos os casos: na calibração por F₁, o erro foi distribuído por todos os grupos com uma contribuição baixa em cada um; na calibração por F₂, o

comportamento foi semelhante ao obtido para o erro absoluto médio com contribuições mais significativas nos grupos de vazões maiores; na calibração por F_3 a participação dos grupos 1, 2 e 4 foi baixa, tendo como maior contribuição nas vazões intermediárias II, grupo 3. Este grupo foi o único que apresentou uma contribuição classificada como alta. Para as calibrações por F_1 e F_2 , o **erro absoluto relativo médio** (F_3) apresentou um comportamento contrário ao obtido para o erro absoluto médio e para o erro quadrático relativo médio, apontando uma dificuldade do modelo de representar as vazões durante períodos de recessão. No entanto, na calibração por F_3 , diferentemente das outras calibrações, houve uma contribuição definida como média no grupo de vazões intermediárias II, apontando o maior erro nas vazões situadas entre a Q_{90} e a Q_{10} .

Tabela 6 - Contribuição dos grupos para os erros calculados.

Função-objetivo da calibração	Grupos	Contribuição para a medida de desempenho		
		F_1	F_2	F_3
F_1	1	Baixa	Baixa	Média
	2	Baixa	Baixa	Média
	3	Média	Baixa	Baixa
	4	Média	Baixa	Baixa
F_2	1	Baixa	Baixa	Média
	2	Baixa	Baixa	Média
	3	Média	Média	Baixa
	4	Média	Média	Baixa
F_3	1	Baixa	Baixa	Baixa
	2	Baixa	Baixa	Média
	3	Média	Alta	Média
	4	Média	Baixa	Baixa

7. CONCLUSÃO

O presente artigo teve como objetivo o estudo da contribuição de grupos de vazões para algumas medidas de desempenho, utilizadas como funções-objetivo da calibração do modelo hidrológico IPH II. Para atingir este objetivo, aplicou-se o modelo IPH II na bacia hidrográfica do rio Tesouras. O modelo foi calibrado a partir do algoritmo mono-objetivo SCE-UA, tendo como funções-objetivo o erro absoluto médio (F_1), o erro quadrático relativo médio (F_2) e erro absoluto relativo médio (F_3). Após as calibrações, a análise visual dos resultados indicou que o modelo subestimava os picos e se comportava de maneira satisfatória durante a recessão. Contudo, esta forma de análise não permitiu estimar a magnitude dos erros além de dificultar a identificação de erros que não fossem suficientemente aparentes. Adicionalmente, para comparar-se o desempenho das calibrações por cada uma das funções-objetivo foi feita a análise da contribuição dos erros em diferentes grupos de vazões no valor resultante da função-objetivo. O resultado dessa análise mostrou que a contribuição dos

grupos para a medida de desempenho (erro) a qual o algoritmo SCE-UA tinha como objetivo otimizar é muito próximo em todas as calibrações e que, de forma geral, aponta o mesmo que a análise visual: a calibração do modelo pelas FOs escolhidas fornecem vazões que representam melhor os períodos de recessão, enquanto os períodos de cheia não são tão bem representados. Todavia, a vantagem desta análise reside no fato de que é possível localizar quais partes do modelo são melhores retratadas e o quão melhores elas são. O fracionamento da série de vazões em grupos indica que as vazões calculadas inferiores a Q_{50} (grupo de vazões mínimas e intermediárias I) apresentam uma boa representação pelo modelo, uma vez que possuem uma contribuição para os erros estimados considerada baixa. Por outro lado, nas vazões acima de Q_{50} (grupo de vazões intermediárias II e máximas) possui uma contribuição considerada média, sendo, portanto, o ponto fraco do modelo nos casos avaliados. Dessa forma, conclui-se que a análise do desempenho do modelo através da separação da série em grupos de vazões mostrou-se muito útil. Esta técnica permitiu que fossem identificadas com clareza as faixas de vazão nas quais o modelo apresentava mais dificuldade de representar. Assim, esta técnica representa algo que permite um melhor ajuste conforme a necessidade do usuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. e TUCCI, C. E. M. (2009). “*Verificação da Eficiência e Eficácia de um Algoritmo Evolucionário Multi-objetivo na Calibração Automática do Modelo Hidrológico IPH II*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Volume 14 n.3.
- COLLISCHONN, W. e TUCCI, C. E. M. (2001). “*Calibração Automática Global do Modelo IPH-2*”. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- COLLISCHONN, W. e TUCCI, C. E. M. (2003). “*Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Volume 8 n.3.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S. e GUPTA, V. (1992). “*Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models*”. Water Resource Research, Vol. 28, NO. 4, pgs. 1015-1031.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S. e GUPTA, V. (1994) “*Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models*”. Journal of Hydrology, Vol 158 pp. 265-284.
- GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M. e SILVEIRA, A. L. L. (1998). “*Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Volume 3 n.4.
- PARIS, A.; OLIVEIRA, G. G.; BAYER, D. M. e COLLISCHONN, W. (2011). “*Método Alternativo de Calibração e Simulação de Modelos Hidrológicos baseado no Fracionamento do Hidrograma*”. Anais XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)
- SANTOS, R.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. e FILHO, A. de S. M. (2001). “*Estimativa do Hidrograma de Projeto com Base na Incerteza dos Parâmetros do Modelo*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Volume 6 n.1.
- TUCCI, C. E. M. (2005). “*Modelos Hidrológicos*”. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2a edição. ISBN 85- 7025-823-2.