



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

INFLUÊNCIA DA ESTIMATIVA DA SÉRIE TEMPORAL DE CHUVA NA CALIBRAÇÃO MULTI-OBJETIVO DO MODELO IPH II

Carlos Henrique Pereira Assunção Galdino¹; Juan Martin Bravo² & Juan Carlos Ticona Gutierrez³

RESUMO – Modelos hidrológicos são utilizados para simular processos do ciclo hidrológico. Diferentes fatores envolvidos na estimativa da série temporal de precipitação média na bacia hidrográfica, como a obtenção dos dados e a representatividade da distribuição espacial dos postos pluviométricos estão sujeitos às incertezas, que influenciam de forma direta no processo de calibração de modelos hidrológicos. O objetivo deste trabalho foi verificar o impacto do número de postos pluviométricos utilizado na estimativa da série temporal de precipitação média na bacia hidrográfica no ajuste de um modelo hidrológico concentrado, como o IPH II. Nesse sentido foi utilizada, como estudo de caso, a bacia hidrográfica do rio Cai (RS). Diferentes processos de calibração automática multi-objetivo foram executados utilizando como dados de entrada, séries temporais de precipitação média na bacia hidrográfica obtidas a partir de diferentes números de postos pluviométricos. Os resultados mostraram que o modelo IPH II conseguiu contornar as modificações nos dados de entrada com a alteração dos valores ótimos dos parâmetros. Porém, se observou uma melhora no desempenho do modelo quando a série de precipitação média utilizada apresentava totais precipitados menores que os obtidos considerando todos os postos.

ABSTRACT– The hydrologic models are used to simulate processes of the hydrologic cycle. Several factors involved in the estimation of the time series of average rainfall over a watershed, such as data gathering and representativeness of the spatial distribution of the gauging stations are subject to uncertainties that influence the calibration of hydrologic models. The major purpose of this study was to assess the impact of the number of rain gauges used to estimate the time series of average rainfall over a watershed in the calibration of the IPH II lumped hydrologic model. Thus, The Cai River basin was used as the case study where several multi-objective automatic calibration processes were performed using as input data, time series of average rainfall derived from different numbers of rain gauges. The results showed the IPH II model could circumvent the modification of the input data with the change of the optimum parameter values. However, an improvement of the model performance was observed when the time series of average rainfall used as input to the model had smaller total precipitation values that those derived using all available gauging stations.

Palavras-Chave – Algoritmo evolucionário; Calibração de modelos; Modelo IPH II.

1) Mestrando do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS (chpag2003@gmail.com)

2) Professor adjunto do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS (jumarbra@iph.ufrgs.br)

3) Mestrando do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS (juancarlos.ticonag@gmail.com)

1- INTRODUÇÃO

A precipitação é entendida em hidrologia como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre (Tucci et al., 2013). É um fenômeno natural e aleatório, que devido à sua importância, tem sido alvo de estudos para melhor caracterizar a disponibilidade de água.

Os processos que compõem o ciclo hidrológico podem ser representados utilizando a modelagem hidrológica, onde modelos que simulam o processo de transformação da chuva em vazão são os mais utilizados. Tais modelos são fundamentados em equações matemáticas que descrevem, de forma simplificada, o comportamento hidrológico da bacia. Esses modelos possuem parâmetros que devem ser definidos através de um processo de calibração. Um dos métodos de obtenção desses parâmetros é a calibração automática, que por sua vez faz, tipicamente, uso de técnicas numéricas de otimização (Tucci, 2005). A calibração é um processo de ajuste dos valores dos parâmetros, de modo que a saída do modelo se assemelhe, de forma mais consistente, ao comportamento do sistema real. Na utilização prática de modelos hidrológicos, esse processo é tipicamente realizado pela comparação entre as vazões observadas em um posto fluviométrico e as vazões calculadas pelo modelo, no mesmo local.

Quando utilizados modelos hidrológicos concentrados, os dados de entradas – precipitação e evapotranspiração – correspondem aos valores médios espaciais, em cada intervalo de tempo. A evapotranspiração não apresenta grandes variações ao longo de bacias pequenas que são representadas por estes modelos e, em consequência, o valor médio é bastante próximo do estimado nos postos pontuais. Para o caso da precipitação, esta apresenta uma maior variabilidade espacial. Além disso, diferentes fatores envolvidos na estimativa do valor médio de precipitação na bacia hidrográfica estão sujeitos às incertezas, como a obtenção dos dados e a representatividade da distribuição espacial dos postos pluviométricos. Esses fatores estão ainda associados à falta de atenção, treino ou perícia do operador, assim como pelas falhas no equipamento utilizado (Mamédio et al., 2013). Essas incertezas influenciam de forma direta no processo de calibração, afetando na determinação dos parâmetros do modelo.

2- OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi verificar o impacto do número de postos pluviométricos utilizado na estimativa da série temporal de precipitação média na bacia hidrográfica no ajuste de um modelo hidrológico concentrado.

3- METODOLOGIA

O procedimento metodológico utilizado é baseado no uso do modelo hidrológico IPH II e do algoritmo de otimização multi-objetivo MOCOM-UA através do programa Win_IPH2. Diferentes processos de calibração automática multi-objetivo do modelo IPH II foram executados utilizando como dados de entrada, séries temporais de precipitação média na bacia hidrográfica, obtidas a partir de diferentes números de postos pluviométricos. Foi verificado o impacto desses dados nos resultados do modelo e na estimativa dos parâmetros. A seguir são descritos, brevemente, o programa Win_IPH2, o algoritmo MOCOM-UA e as funções-objetivo utilizadas.

3.1- Programa Win_IPH II

O IPH II é um modelo hidrológico chuva-vazão, do tipo concentrado, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Ele é baseado num algoritmo de separação do escoamento desenvolvido por Berthelot (1970), que utilizou a equação da continuidade, em combinação com a equação de infiltração de Horton e uma função empírica para a percolação. É composto dos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação; separação do escoamento; propagação dos escoamentos superficial; e subterrâneo (Tucci, 2005).

O programa WIN_IPH2 (Bravo et al., 2006a) foi desenvolvido para acoplar as versões do modelo IPH II para a simulação de séries contínuas e eventos isolados, utilizando dois algoritmos de otimização. Essa versão apresenta uma interface amigável, com saída gráfica de resultados. Possui as opções de calibração manual e automática, onde o algoritmo SCE-UA (Duan et al., 1992) é utilizado na calibração automática mono-objetivo e o algoritmo MOCOM-UA (Yapo et al., 1998) é utilizado na calibração automática multi-objetivo (Bravo et al., 2007).

3.2- Algoritmo MOCOM-UA

O algoritmo MOCOM-UA (*Multiple-Objective Complex Evolution* - Universidade do Arizona) é um algoritmo evolucionário multi-objetivo desenvolvido por Yapo et al. (1998), e consiste em uma variação do algoritmo SCE-UA (Duan et al., 1992), que foi gerado para resolver problemas de calibração mono-objetivo. Também está baseado em técnicas fundamentadas em algoritmos genéticos e no algoritmo simplex de Nelder e Mead (Collischonn e Tucci, 2003).

Os passos utilizados pelo algoritmo são descritos conforme Bravo (2006b):

1. Início do processo: define-se o tamanho da população de indivíduos “ns”, que é o único parâmetro do algoritmo;

2. Geração da população inicial: são gerados “ns” indivíduos, cada um deles representando um conjunto de parâmetros do modelo hidrológico, no interior do espaço factível definido pelos limites máximo e mínimo de cada parâmetro. Esses conjuntos de indivíduos são selecionados de forma aleatória, utilizando uma distribuição de probabilidades uniforme. Cada indivíduo representa um ponto no espaço, onde as coordenadas desse ponto são os valores dos parâmetros.
3. Avaliação das funções-objetivo: cada ponto da população é avaliado com base nas “nf” funções-objetivo (uma rodada do modelo hidrológico com base no conjunto de parâmetros definido em cada ponto e posterior cálculo das “nf” funções-objetivo) gerando uma matriz de resultados F (ns,nf).
4. Hierarquização dos pontos: é atribuído a cada indivíduo da população um ranking multi-objetivo, que é definido através do ordenamento de Pareto. Assim, são definidos ranking (ri) de 1 a Rmax, onde Rmax é menor ou igual a “ns”. Os indivíduos ditos não dominados (melhores resultados em termos das funções-objetivo) na população inicial possuem ranking 1 e os piores possuem ranking Rmax.
5. Geração de complexos: são gerados NRmax complexos, onde: NRmax é igual ao número de indivíduos, aos quais foi dado o pior ranking durante a etapa anterior. Cada complexo possui n+1 indivíduos, onde “n” é o número de parâmetros utilizados pelo modelo hidrológico a ser calibrado (que são sete no caso do modelo IPH II). Um desses n+1 indivíduos possui valor do ranking Rmax. Os restantes “n” indivíduos são selecionados, aleatoriamente, entre todos os indivíduos. A probabilidade de cada indivíduo ser selecionado depende de seu ranking e, é calculada pela equação 1, sendo favorecidos aqueles indivíduos que possuem menor ranking (melhores).

$$p_i = \frac{(R_{max} - r_i + 1)}{\sum_{i=1}^{ns} (R_{max} - r_i + 1)} \quad (1)$$

onde “pi” é a probabilidade de ser selecionado o indivíduo “i”, que possui um ranking “ri” e Rmax é o ranking dos piores indivíduos presentes na população.

6. Evolução dos complexos: é realizada pelo método simplex de Nelder e Mead, semelhantemente ao algoritmo SCE-UA, neste caso com várias funções-objetivo. O indivíduo com pior ranking do complexo é identificado (indivíduo que possui ranking Rmax) e o centroide dos indivíduos restantes é calculado. Os passos de reflexão e contração são analisados, com base nos critérios de dominância. Com isso, o indivíduo

gerado por reflexão é aceito somente se estiver dentro da região factível (valores limites dos parâmetros) e se for não dominado pelos outros integrantes do complexo. Caso contrário, o indivíduo gerado por contração é aceito imediatamente.

7. A evolução de cada complexo se dá uma única vez, gerando NRmax novos indivíduos (filhotes) que substituem os NRmax piores indivíduos anteriores.
8. Mistura dos complexos: os diferentes complexos criados são devolvidos à população.
9. Teste de convergência: satisfeito o critério de parada, o algoritmo termina. O critério de parada utilizado no algoritmo MOCOM-UA finaliza o processo quando todos os indivíduos da população são não dominados (possuem ranking 1). No caso contrário, o procedimento retorna ao passo 3.

3.3- Funções-objetivo utilizadas

Uma maneira de avaliar o desempenho na calibração de modelos hidrológicos é utilizando funções-objetivo (FO) que, tipicamente, representam uma medida quantitativa estimada a partir da diferença numérica (erro) entre os resultados do modelo (hidrogramas) e os valores observados. Nesse contexto, a finalidade da calibração automática consiste em encontrar os valores dos parâmetros que otimizam (maximizam ou minimizam) as funções-objetivo (Bravo et al., 2007).

Neste trabalho foram utilizadas duas funções-objetivo: o desvio padrão das inversas das vazões (equação 2), que tende a priorizar as vazões mínimas; e o coeficiente de Nash e Sutcliffe (equação 3), que tende a priorizar as vazões médias e máximas.

$$FO2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} \left(\frac{1}{Q_{oi}} - \frac{1}{Q_{ci}} \right)^2}{NT}} \quad (2)$$

$$FO1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NT} (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^{NT} (Q_{oi} - Q_m)^2} \quad (3)$$

onde Q_{oi} é o valor de vazão observada no intervalo de tempo i , Q_{ci} é o valor de vazão calculada no intervalo de tempo i , NT é o número de intervalos de tempo da série analisada e Q_m é a vazão média da série.

4- ESTUDO DE CASO

O estudo foi realizado em um trecho da bacia do rio Caí (Figura 1), situado no estado do Rio Grande do Sul, com uma área de abrangência de 2.030 km², com exutório no posto fluviométrico

Nova Palmira (código 87160000) e coordenadas geográficas latitude 29,3356O e longitude 51.1883S.

Essa bacia foi escolhida pelo fato de possuir postos pluviométricos e fluviométricos com boa disponibilidade temporal de dados consistidos. Foram selecionados os cinco postos pluviométricos apresentados na Tabela 1, e utilizados oito anos de dados (de 1961 a 1968) sem falhas nas análises.

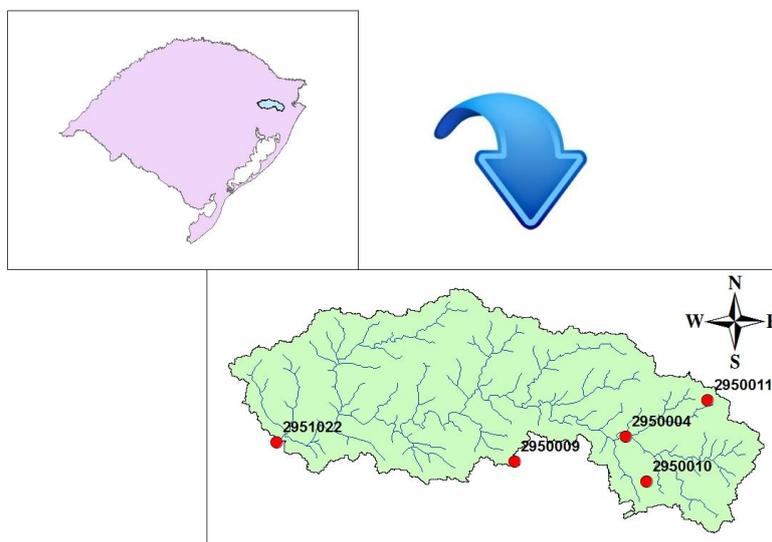


Figura 1 - Bacia do rio Caí até o posto fluviométrico Nova Palmira

Tabela 1- Descrição dos postos pluviométricos utilizados pertencentes à bacia do rio Caí

Código	Nome do Posto	Descrição do posto	Longitude	Latitude
2950004	Barragem Blang	Posto 1 (P1)	- 50.62	- 29.33
2950009	Canela	Posto 2 (P2)	- 50.80	- 29.37
2950010	Capão dos Coxos	Posto 3 (P3)	- 50.58	- 29.40
2950011	Cerrito	Posto 4 (P4)	- 50.48	- 29.27
2950022	Passo do Louro	Posto 5 (P5)	- 50.19	- 29.33

Silva (2011) analisou formas de quantificar o valor da chuva em uma determinada área, para uso em modelos hidrológicos concentrados, onde constatou que a média aritmética se mostrou bastante eficiente. Assim, a média aritmética dos valores pontuais foi utilizada para a estimativa da série temporal de precipitação na bacia hidrográfica em este trabalho.

Com base nos cinco postos pluviométricos selecionados foram estimadas as séries temporais de precipitação média na bacia hidrográfica utilizando diferentes números de postos. Não foram feitas todas as combinações possíveis e apenas consideradas as alternativas apresentadas na Tabela 2. As combinações analisadas incluíram: (1) os postos individualmente, (2) considerando os cinco postos selecionados, (3) considerando a retirada de um posto pluviométrico (quatro postos selecionados) e (4) considerando a retirada de dois postos pluviométricos (três postos selecionados).

Posteriormente foi estimado o valor médio de precipitações anual para cada série. Tomando como base o valor médio da precipitação anual obtido considerando os cinco postos pluviométricos, foram ainda estimadas as diferenças entre este valor e o obtido com as restantes séries, sendo os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Estatísticas das séries temporais de precipitação média na bacia hidrográfica do rio Cai

Descrição dos Postos utilizados	Média	Diferença entre médias
Posto 1	1233,7	-321,2
Posto 2	1934,5	379,6
Posto 3	1627,9	73,0
Posto 4	1507,5	-47,4
Posto 5	1478,3	-76,6
Com todos os postos	1554,9	-
Retirando P1	1635,2	80,3
Retirando P2	1460,0	-94,9
Retirando P3	1536,7	-18,2
Retirando P4	1569,5	14,6
Retirando P5	1576,8	21,9
Retirando P1 e P2	1536,7	-18,2
Retirando P1 e P3	1638,9	84,0
Retirando P1 e P4	1679,0	124,1
Retirando P1 e P5	1689,9	135,0
Retirando P2 e P3	1405,3	-149,6
Retirando P2 e P4	1445,4	-109,5
Retirando P2 e P5	1456,4	-98,5
Retirando P3 e P4	1547,6	-7,3
Retirando P3 e P5	1558,6	3,7
Retirando P4 e P5	1598,7	43,8

Verificou-se que selecionando quatro postos (séries obtidas considerando a retirada do posto 1, a retirada do posto 2 e a retirada do posto 3) e selecionando três postos (séries obtidas considerando a retirada dos postos 1 e 5 e a retirada dos postos 2 e 3) foram obtidas as maiores diferenças em termos do valor médio de precipitação anual. Assim, estas séries temporais, junto com a obtida considerando todos os postos, foram utilizadas nas análises.

5- RESULTADOS

Os resultados obtidos através da calibração automática multi-objetivo do modelo IPH II com o algoritmo MOCOM-UA, em termos dos conjuntos de parâmetros que geraram soluções na aproximação de região de Pareto, são apresentados na Figura 2 para os diferentes dados de precipitação utilizados. Por sua vez, as correspondentes aproximações da região de Pareto são apresentadas na Figura 3.

Observa-se que foram obtidos resultados diferentes para os diferentes dados de entrada de precipitação utilizados. Quando utilizados todos os postos para estimar a precipitação média na bacia (Figura 2(a)) e retirando o posto 3 (Figura 2(d)) e os postos 1 e 5 (Figura 2(e)), a dispersão dos valores dos parâmetros é maior que nos outros casos, existindo pontos em comum entre as soluções. A menor dispersão dos valores dos parâmetros é observada quando os dados de precipitação média foram obtidos retirando os postos 2 e 3, situação onde os totais anuais de precipitação resultam um 10% inferior, em média, quando comparada a série obtida utilizando todos os postos. A utilização da série de precipitação obtida retirando os postos 2 e 3 também levou aos melhores resultados em termos das funções-objeto, conforme pode ser observado na Figura 3(b), com uma aproximação da região de Pareto claramente superior as obtidas nos restantes processos de calibração.

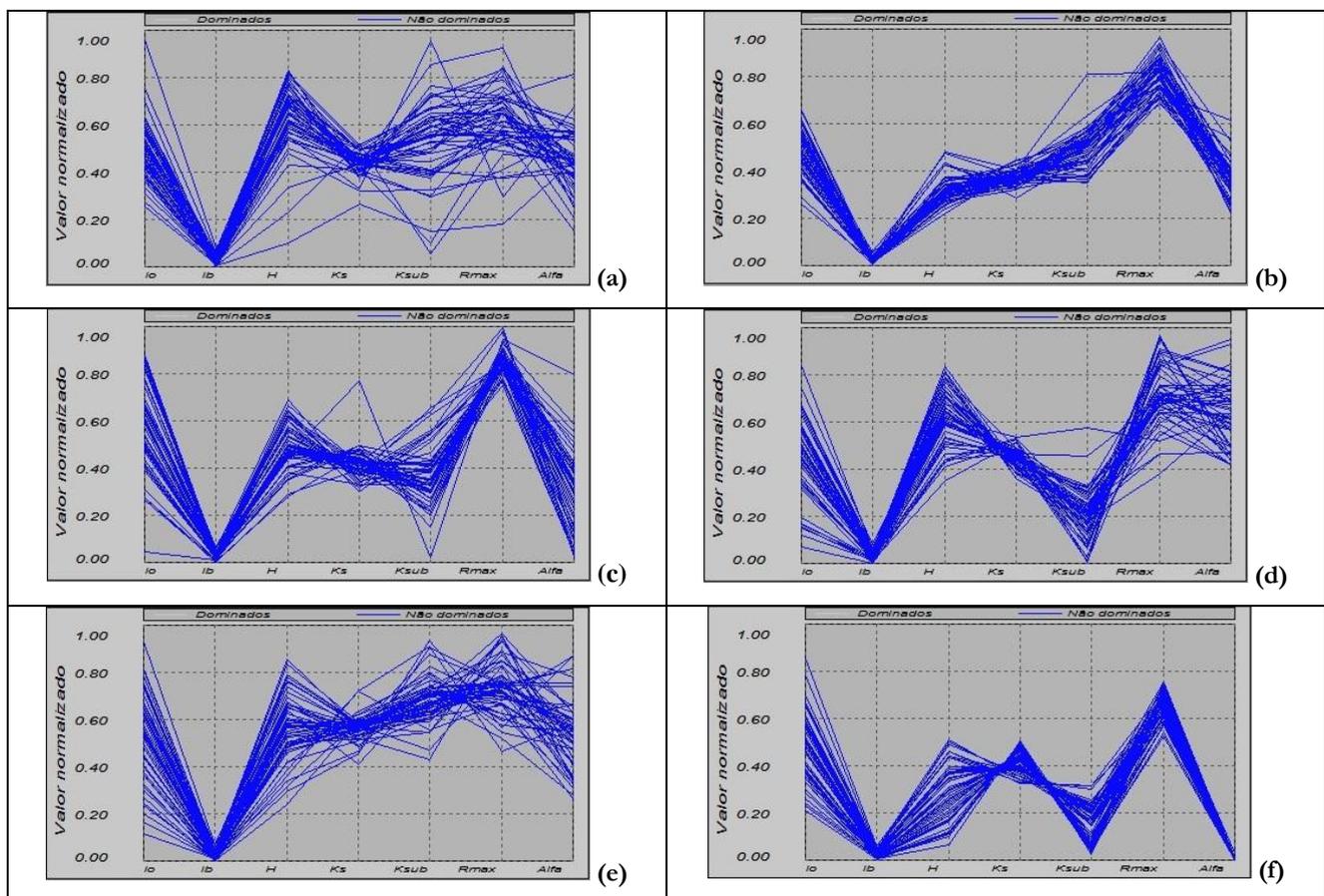


Figura 2 – Conjunto de parâmetros que geraram a aproximação da região de Pareto na calibração multi-objetivo do modelo IPH II a partir de diferentes séries temporais de dados de precipitação média na bacia hidrográfica: (a) Considerando todos os postos; (b) Considerando a retirada do posto 1; (c) Considerando a retirada do posto 2; (d) Considerando a retirada do posto 3; (e) Considerando a retirada dos postos 1 e 5; (f) Considerando a retirada dos postos 2 e 3.

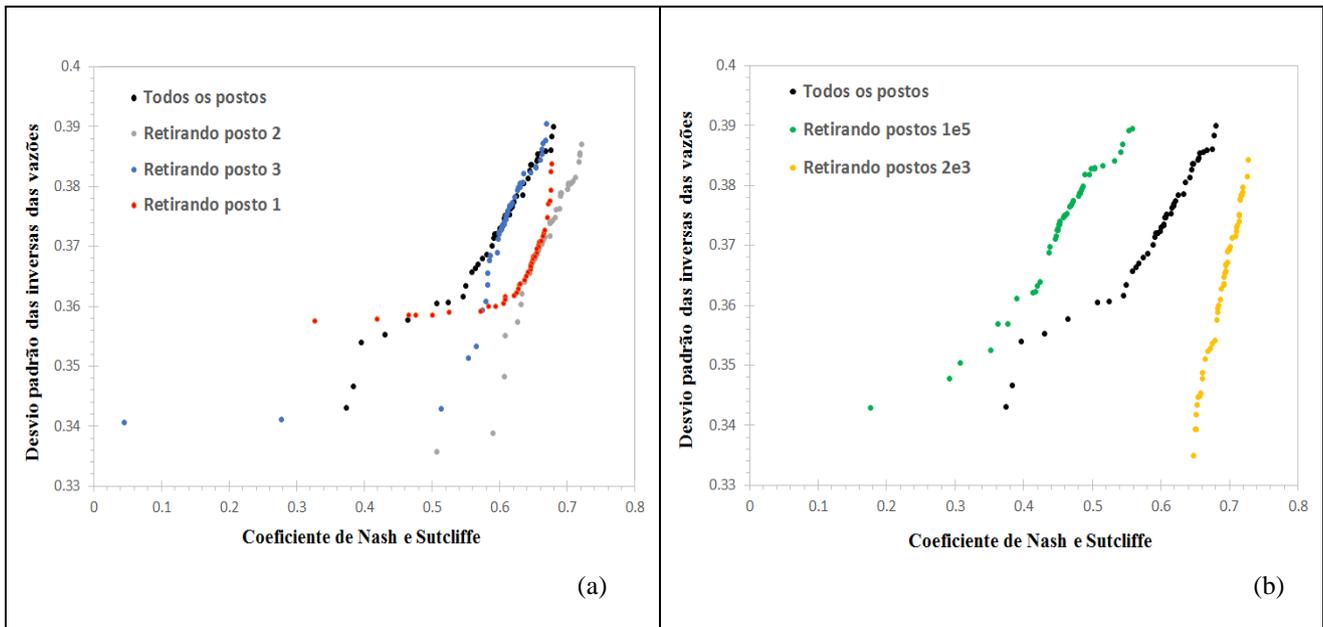


Figura 3 – Aproximações da região de Pareto obtidas na calibração automática multi-objetivo em função dos diferentes dados de precipitação utilizados: (a) considerando a retirada de um posto; (b) considerando a retirada de dois postos.

A Figura 4 apresenta as vazões simuladas e observadas no período: Agosto de 1965 a Abril de 1966. Enquanto a vazões simuladas, são apresentados os resultados correspondentes à solução localizada na parte central da aproximação da região de Pareto obtida com cada um dos diferentes conjuntos de dados de precipitação. Observa-se um padrão de superestimativa das vazões de pico quando utilizada a série de precipitação média obtida com todos os postos, enquanto que quando foi utilizada a série de precipitação média, obtida com a retirada dos postos 2 e 3, foi obtida uma série de vazões que se aproximam mais aos valores observados, pois observa-se uma melhor representação das vazões mínimas e médias, além de aproximar as vazões de pico simuladas às observadas.

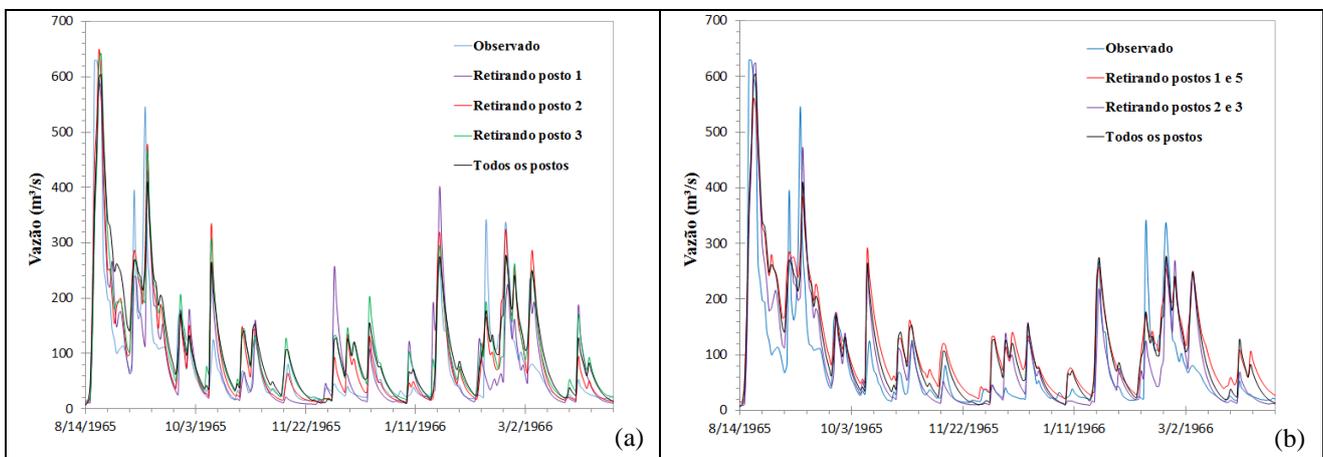


Figura 4 – Hidrogramas observados e calculados em função de diferentes dados de precipitação: (a) considerando a retirada de um posto; (b) considerando a retirada de dois postos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse trabalho avaliou o impacto do número de postos pluviométricos utilizado na estimativa da série temporal de precipitação média na bacia hidrográfica no ajuste de um modelo hidrológico concentrado. O modelo IPH II conseguiu contornar as modificações nos dados de entrada com a alteração dos valores ótimos dos parâmetros, porém, se observou uma melhora no desempenho do modelo aplicado ao estudo de caso da bacia do rio Cai, quando a série de precipitação média utilizada apresentava totais precipitados menores que os obtidos considerando todos os postos disponíveis. Isto permitiu uma melhor representação das vazões mínimas e médias, além de aproximar as vazões de pico simuladas às observadas. Além disso, a aproximação da região de Pareto, quando utilizadas estas séries, foi claramente superior que as obtidas quando utilizada a série de precipitação média obtida com todos os postos ou séries que apresentavam totais precipitados ainda maiores que os desta última. Recomenda-se que o procedimento apresentado nesse trabalho seja aplicado em outras bacias hidrográficas com diferentes disponibilidades de dados para verificação dos padrões observados neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

O primeiro e terceiro autor desse trabalho gostariam de agradecer ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida.

BIBLIOGRAFIA

- BRAVO, J. M.; ALASSIA, G. G. P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. (2006a) *Manual de Usuário do WIN_IPH2*. Versão 1.0 Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 62 pg.
- BRAVO, J. M.; ALASSIA, G. G. P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. (2006b) *Manual de Conceitos do WIN_IPH2*. Versão 1.0 Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 27 pg.
- BRAVO, J. M.; PICCILLI, D. G. A.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. (2007) “Avaliação Visual e Numérica da Calibração do Modelo Hidrológico IPH II com Fins Educacionais” in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2003) *Ajuste Multi-objetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 8, n.3, p. 27-39.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992) Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* Vol. 28 No. 4. pp. 1015-1031.
- MAMÉDIO, F. M. P.; BRAVO, J. M.; FAN, F. M.; KAYSER, R.; SORRIBAS, M. V.; BORTOLIN, T. A.; ECHEVERRÍA, C.; MAHUNGUANA, M. J.; CONTERATO, E. (2013) “Influência da Disponibilidade de Dados na Estimativa de Precipitação Média Anual em Bacias Hidrográficas” in Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves-RS.
- SILVA, V. S. V. (2011) *Estimativa de Precipitação Pontual em Diferentes Escalas para Uso em Modelo Concentrado Chuva-Vazão*. Dissertação. Porto Alegre, 2011.
- SORRIBAS, M. V.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. (2013) “Avaliação Preliminar do Algoritmo de Otimização Multiobjetivo MOSCEM-UA Aplicado na Calibração do Modelo Hidrológico MGB-IPH” in Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves-RS.
- TUCCI, C. E. M. (2005) *Modelos hidrológicos*. 2ª Edição, Editora da UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).
- TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. [et al]. (2013) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4ª Edição, 5ª reimpressão, Editora da UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).
- YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. (1998) *Multi-objective global optimization for hydrologic models*. *Journal of Hydrology*, Vol. 204 pp. 83-97.