

Calibração Automática do modelo hidrológico IPH II aplicado a Bacia Fragosos, Sul do Brasil

Automatic calibration of the hydrologic model IPH II for the Fragosos basin, southern Brazil

Pablo Gustavo Del Prete^{1(*)}
Masato Kobiyama²

Resumo

A calibração automática de modelos hidrológicos com a utilização do algoritmo Metropolis Monte Carlo pode tornar-se uma ferramenta importante na simplificação da aplicação desses modelos em diversas situações práticas. O presente trabalho apresenta uma metodologia para calibrar de forma automática o modelo hidrológico IPH II, aplicado na bacia de Fragosos, que se encontra na divisa entre os estados do Paraná e Santa Catarina. Foram desenvolvidos dois esquemas de calibração automática utilizando o algoritmo Metropolis Monte Carlo com o objetivo de obter um conjunto consistente de parâmetros do modelo: a) calibrar cada evento individualmente e adotar os valores médios dos parâmetros calculados e, b) calibrar todos os eventos em forma simultânea, com a avaliação da bondade da calibração de cada esquema. Os resultados obtidos indicam que a calibração automática simultânea de vários eventos é o esquema de calibração mais consistente; e que o algoritmo testado é capaz de obter um conjunto de parâmetros do modelo IPH II que simula o hidrograma observado.

Palavras-chave: calibração automática simultânea; Metropolis Monte Carlo; IPH II.

Abstract

The automatic calibration of hydrological models through the Metropolis *Monte Carlo* algorithm is an important tool for simplifying the application of such models

-
- 1 MSc.; Engenheiro Mecânico Aeronáutica; Professor na Universidad Nacional de Cordoba, UNC, Argentina; Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC; Endereço: Rua Delfino Conti, s/nº, Trindade, CEP: 88040-900 – Florianópolis; Santa Catarina, Brasil; E-mail: pagusdelprete@gmail.com (*) Autor para correspondência.
 - 2 Dr.; Ciências Especiais; Professor Titular no Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Departamento de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS; Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq; Endereço: Caixa-postal: 15029, CEP: 91501970 - Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil - E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br

Recebido para publicação em 11/11/2015 e aceito em 4/11/2016

Ambiência Guarapuava (PR) v.13 n.1 p. 201 - 220 Jan./Abr. 2017 ISSN 2175 - 9405
DOI:10.5935/ambiencia.2017.01.13

to different practical situations. The present work introduced a methodology for the automatic calibration of the hydrological model IPH II which was applied to the Fragosos basin. This basin is on the border between *Parana* and *Santa Catarina* states. Two automatic calibration schemes that make use of the above mentioned algorithm were introduced in order to obtain a consistent set of the model parameters: a) to calibrate each event individually and to adopt the mean values of the estimated parameters; and b) to calibrate all the events simultaneously, with the assessment of the fitting performance in each scheme. The results indicate that the simultaneous automatic calibration of several events was the most consistent calibration scheme and that the Metropolis *Monte Carlo* algorithm is able to obtain a set of parameters IPH II model that simulates the observed hydrogram.

Key words: simultaneous automatic calibration; Metropolis *Monte Carlo*; IPH II.

Introdução

A modelagem hidrológica, junto com o monitoramento hidrológico, compõe o princípio dos procedimentos para compreender os processos chuva-vazão que são de grande interesse na hidrologia. Para investigar tais processos, têm sido propostos diversos modelos hidrológicos no mundo.

Devido ao avanço tecnológico da informática, os modelos hidrológicos estão cada vez mais sofisticados e complexos, introduzindo o maior número de parâmetros variáveis na entrada dos mesmos. Isso acarreta uma dificuldade no ajuste e na calibração manual. Portanto, surge a necessidade técnico-científica de utilizar a calibração automática.

Em um trabalho pioneiro, Beard (1966) empregou a calibração automática para ajustar o modelo hidrológico HEC1, predecessor do conhecido modelo hidrológico HEC-HMS proposto por USACE-HEC (2010).

Na década de 70, foi intensificada a discussão desse assunto. Ibbitt (1970) utilizou a calibração automática para ajustar

um modelo hidrológico para diferentes combinações de séries com e livre de erros, e estudou os efeitos dos erros sobre o ajuste. Clarke (1973) estudou a representatividade da função objetivo com respeito ao desempenho do ajuste.

No Brasil, Collischonn e Tucci (2001 e 2003) utilizaram o algoritmo de otimização mono-objetivo SCE-UA e sua versão MOCOM-UA para multi-objetivo aplicado no modelo hidrológico conceitual IPH II, proposto por Tucci et al. (1981), com distintas funções-objetivo. Vrugt et al. (2003) testaram diferentes técnicas para a calibração automática de modelos hidrológicos e propuseram uma versão modificada do algoritmo original de otimização global SCE-UA e conseguiram reduzir significativamente o número de simulações do modelo, necessárias, com respeito à versão anterior.

A calibração de modelos hidrológicos utilizando o Metropolis Monte Carlo (KIRKPATRICK et al., 1983) foi testado em algumas bacias argentinas por Del Prete (2009) que utilizou séries geradas sinteticamente e séries reais de chuva e vazão.

Como cada bacia possui sua peculiaridade, um método deve ser testado e discutido com diversos tipos de bacias.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o rendimento do método de calibração automática global mono-objetivo baseado no algoritmo metaheurístico de Metropolis Monte Carlo (KIRKPATRICK et al., 1983), aplicado no modelo hidrológico conceitual IPH II, proposto por Tucci et al. (1981). Para isso este método foi implementado com o fim de simular os processos chuva-vazão em eventos extremos (enchentes) e um conjunto deles na bacia hidrográfica de Fragosos, situada na divisa dos estados do Paraná e de Santa Catarina.

Essa bacia é cabeceira na Rede de Bacias-Escola na região do Alto Rio Negro (KOBIYAMA et al., 2009). Uma das motivações da implementação dessa rede foi a ocorrência frequente de inundação na bacia do rio Negrinho, especialmente no centro urbano do município do Rio Negrinho. A descrição mais detalhada sobre inundações desse município encontra-se em Giglio e Kobiyama (2011) e Malutta e Kobiyama (2011). E existem moradores locais que associam a ocorrência de inundação com as chuvas intensas e suas conseqüentes vazões na bacia de Fragosos. Por essa razão, é de extrema importância estudar os processos chuva-vazão da bacia de Fragosos.

Algoritmo de Metropolis Monte Carlo

Kirkpatrick et al. (1983) introduziram o conceito de *Simulated Annealing* (SA) e desde então, essa metaheurística se tornou uma ferramenta muito exitosa na resolução de uma ampla gama de problemas de otimização combinatória. Esse algoritmo baseia-se

naquele desenvolvido por Metropolis et al. (1953), fundamentando-se no processo físico do aquecimento de um sólido, seguido por esfriamento controlado (progressivo ou lento) até conseguir um estado cristalino, com uma estrutura perfeita.

Otimização estocástica segundo a distribuição de probabilidade de Boltzmann

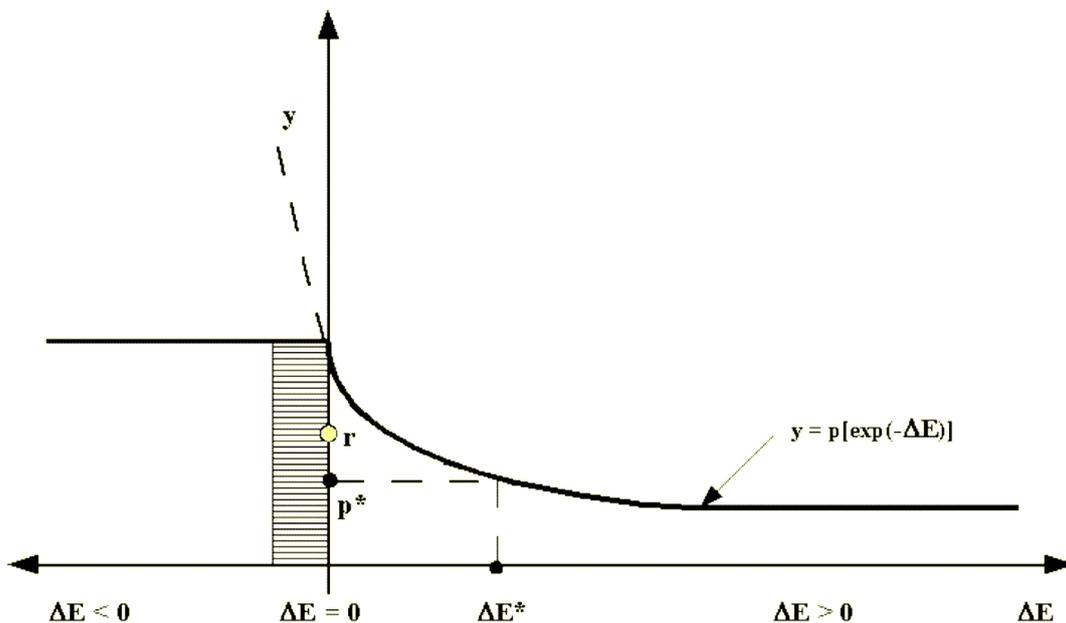
A idéia inicial foi considerar o sistema como um sistema termodinâmico que muda de configuração sucessivamente, passando de um estado de energia E1 a outro E2 com uma probabilidade:

$$P = \text{Prob}(E1 \rightarrow E2) = \exp \left[- \frac{(E2 - E1)}{kT} \right] \quad (1)$$

onde k é uma constante física, denominado de Boltzmann; e T é a temperatura.

Se E2 é menor que E1, a probabilidade P é maior a um, a mudança de configuração do sistema é certamente um fato, com probabilidade igual a um. Na figura 1, encontra-se o algoritmo de Metropolis para um valor dado de temperatura T e atribuído a k o valor de um, sendo $\Delta E = E2 - E1$. A figura 1 representa a lei de variação da probabilidade de transição em função do gradiente de energia que determina as mudanças sucessivas de configuração do sistema. Para valores de ΔE igual ou menor a zero, o valor da probabilidade de transição é um; para valores maiores a zero de ΔE , os valores da probabilidade diminuem exponencialmente.

Figura 1- Probabilidade de mudança da configuração de um sistema segundo o algoritmo de Metropolis



Fonte: Bertoni (2001).

Para utilizar o algoritmo de Nicholas Metropolis em sistemas não termodinâmicos, é necessário definir os seguintes elementos:

- Uma descrição de todas as configurações possíveis do sistema (por exemplo, intervalos de valores possíveis dos parâmetros do sistema).
 - Um gerador de mudanças aleatórias sucessivas na configuração do sistema.
 - Uma função objetivo E a ser minimizada (análoga à energia).
 - Uma identificação do parâmetro de controle T (análoga à temperatura) e do grau de esfriamento progressivo do sistema (SA), quer dizer, o número de mudanças da configuração do sistema em cada valor de T .
- Sendo um sistema que está afetado por

mudanças sucessivas em sua configuração, $P(E1 \rightarrow E2)$ é a probabilidade de transição, ou seja, a probabilidade para passar da configuração $E1$ a $E2$. O algoritmo de Metropolis considera que:

$$P(E1 \rightarrow E2) = \begin{cases} e^{-\frac{\Delta E}{kT}} & \Delta E > 0 \\ 1 & \Delta E \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

com $\Delta E = E2 - E1$.

Na equação (2), observa-se que, para valores elevados de T , têm-se condições de aceitação próximas a um, ou seja, o sistema aceita a maioria das mudanças de

configuração propostas. Ao contrário, na medida em que T diminui, a probabilidade de aceitação das mudanças propostas diminui. Quando a probabilidade de transição se considera invariante a sucessivas mudanças, considera-se que o sistema é independente do tempo e está em equilíbrio.

Método de Metropolis Monte Carlo

O método de Metropolis Monte Carlo combina o algoritmo de Metropolis com um gerador de números aleatórios. O método é do tipo aceitação e rejeição. Esse tipo de método é utilizado para gerar números aleatórios segundo uma distribuição de probabilidades sobre um intervalo. Esse método constitui um caso particular das técnicas de simulação de Monte Carlo por Cadeias de Markov (MCMC) (BERTONI, 2003).

A cadeia de Markov é um método que, em sua operação, gera uma sequência de pontos aleatórios. A cadeia de Markov é conhecida pela sua simplicidade e capacidade para descrever comportamentos muito complexos. É de interesse que a cadeia de Markov convirja em uma distribuição de probabilidades arbitrárias no espaço de estudo.

O critério de aceitação de Metropolis Monte Carlo é o seguinte, determinado ΔE :

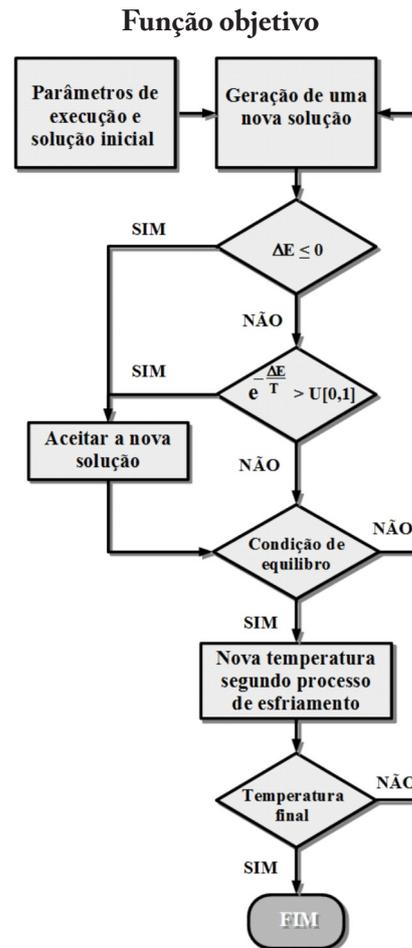
- Se $\Delta E \leq 0$ aceita-se o novo conjunto de parâmetros θ_t e se adota $\theta_2 = \theta_t$.
- Se $\Delta E > 0$ realiza-se o seguinte processo de aceitação ou rejeição:

Gera-se um número aleatório com distribuição uniforme, $r \sim U[0,1]$:

- o Se $r < \frac{P(\theta_t)}{P(\theta_1)} < 1$, adota-se $\theta_2 = \theta_t$.
- o Se $\frac{P(\theta_t)}{P(\theta_1)} < r$, rejeita-se θ_t e adota-se $\theta_2 = \theta_1$.

Na figura 1, representa-se o ponto r e a variação de probabilidade de transição. Na figura 2, apresenta-se o diagrama de fluxo do algoritmo Metropolis Monte Carlo.

Figura 2 – Algoritmo de Metropolis Monte Carlo



Fonte: Del Prete (2009).

No presente trabalho, adotou-se a Função Quadrática como a função objetivo (FO) na calibração:

$$FO = \sum_{i=1}^N (V_{o_i} - V_{c_i})^2 \quad (3)$$

onde V_{O_i} é a vazão observada no intervalo i ; V_{C_i} é a vazão calculada no intervalo i ; e N é o número de intervalos dos hidrogramas comparados. Segundo Tucci (1998), essa função atribui maior peso às vazões maiores. No ajuste de um período contínuo de vazões, a tendência do ajuste será de aproximar melhor eventos extremos, tendo em conta que, para uma diferença de vazões iguais, a porcentagem do erro é maior quando as vazões são menores.

Para o caso da calibração simultânea, adotou-se uma FO igual à equação (3) dividida pelo número de eventos.

Esquemas de esfriamento

Não existem regras conclusivas no momento certo de implementar o algoritmo de Metropolis Monte Carlo, porém podem-se agrupar algumas tendências para se tomarem decisões genéricas e específicas para cada problema. Essas decisões relacionam-se basicamente com os parâmetros que regulam o programa de esfriamento, incluindo os valores máximos e mínimos de variação da temperatura, a velocidade de esfriamento e as condições de parada do processo. Resultados teóricos obtidos por Van Laarhoven e Aarts (1987) e Aarts e Korst (1989), que utilizaram a teoria das cadeias de Markov, demonstraram que, com um programa de esfriamento infinitamente lento, o algoritmo de SA converge ao ótimo global com uma probabilidade igual a um, enquanto a temperatura converge a zero (DOWSLAND; DÍAZ, 2003).

Existem diferentes esquemas de esfriamento, entre os quais se tem proposto do tipo geométrico (equação (4)) e do tipo potencial (equação (5)). Neles, os valores de α (grau de esfriamento) estão compreendidos

no intervalo de 0,10 a 1,00:

$$T_j = \alpha T_{j-1} \quad (4)$$

$$T_j = \alpha_j T_0 \quad (5)$$

onde T_j é a temperatura correspondente ao passo j ; T_{j-1} é a temperatura correspondente ao passo $j-1$; e T_0 é a temperatura inicial.

O grau de esfriamento α regula a evolução da temperatura em cada iteração. Na definição de α , deve-se lidar com uma situação de compromisso entre

- Uma escolha de um valor de α que produza uma diminuição demasiado rápida e, em consequência, uma convergência prematura do algoritmo.

- A adoção de um valor de α que produza uma evolução excessivamente lenta que prolongue demasiado o tempo de cálculo.

A evidência empírica e os resultados teóricos sugerem que os detalhes concretos do programa de esfriamento não são tão importantes como a velocidade a que se reduz a temperatura. Além disso, esquemas de esfriamentos, tanto do tipo geométrico como do tipo potencial têm resultados similares quando o esfriamento se produz no mesmo intervalo de temperaturas e para um número total de iterações similares. Para este trabalho adotou-se a equação (5).

Função geradora de números aleatórios

Testaram-se vários algoritmos para gerar números aleatórios, entre eles as funções próprias do FORTRAN e outras propostas em “Numerical Recipes in FORTRAN 90”, adotando-se o algoritmo para gerar números aleatórios (“Minimal” random number generator) de Park e Miller combinada

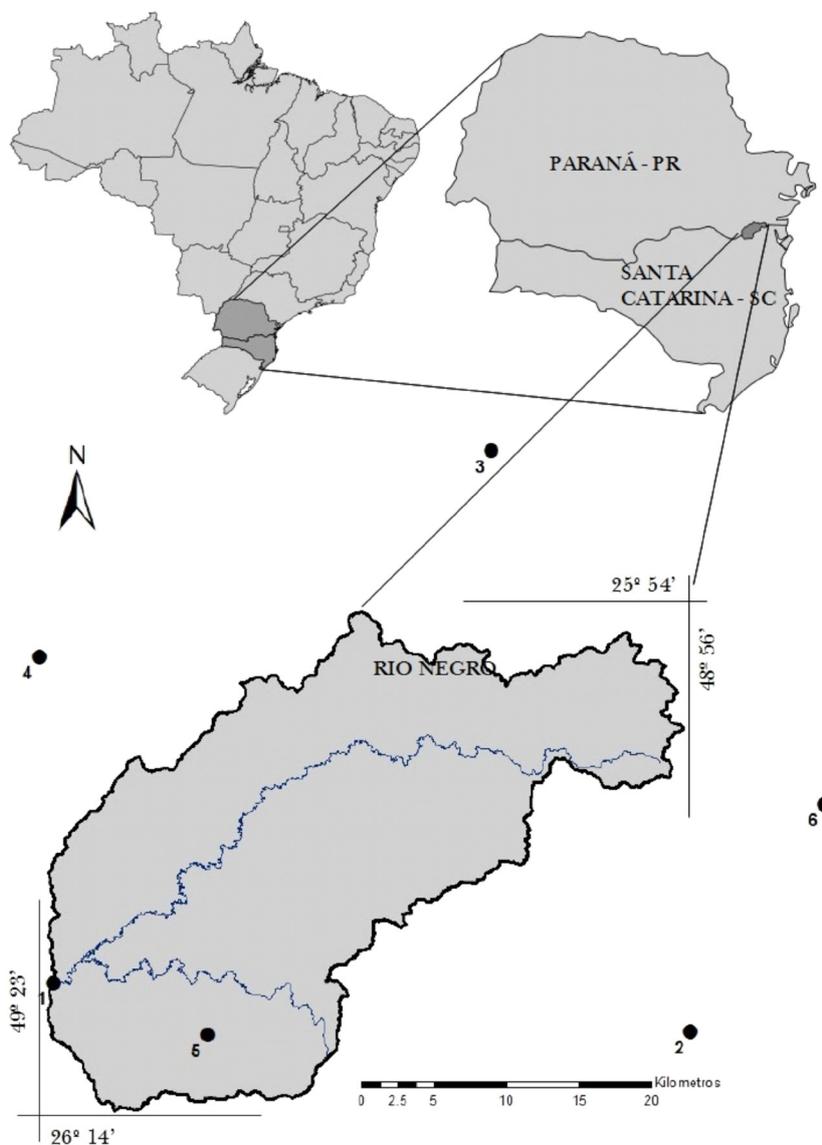
com a sequência de mudança de Marsaglia, apresentado em Press et al. (1996).

Material e Métodos

O modelo IPH II foi aplicado à bacia de Fragosos (794 km²) (Figura 3), localizada

na divisa dos estados do Paraná e de Santa Catarina, entre as coordenadas 25° 54' e 26° 14' de latitude Sul e os meridianos 48°56' e 49°23' de longitude Oeste. A chuva média anual dessa bacia, no período de maio de 1967 até dezembro de 2010, foi de 1650 mm. No mesmo período, a vazão média foi de 20 m³/s.

Figura 3 – Local da bacia de Fragosos. (Os números dos pontos correspondem às estações pluviométricas apresentadas na Tabela 3)



Os detalhes do modelo IPH II são apresentados em Tucci (1998). Esse modelo tem oito parâmetros que podem ser calibrados. Neste trabalho foram considerados os eventos de chuva, não as perdas por evapotranspiração, reduzindo a seis o número de parâmetros.

O tempo de concentração T_c foi estimado com três equações, pois esse parâmetro varia muito dependendo da equação utilizada. As equações utilizadas são:

(i) Equação proposta por Germano et al. (1998):

$$T_c = 18,628 \frac{L^{0,882}}{IMP^{0,272}} \quad (6)$$

onde L é o comprimento do rio principal [km]; e IMP é a porcentagem da área impermeável (%);

(ii) Kirpich (1940):

$$T_c = 3,989 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (7)$$

onde S é a declividade [m/m]; e (iii) equação de Dooge (Porto 1995):

$$T_c = 21,88 \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}} \quad (8)$$

Onde: A é a área da bacia [km^2]. Assim, para o tempo de concentração, adotou-se um valor constante em função das três equações analisadas.

Para fornecer as informações necessárias para a equação (6), foi gerado o mapa de uso de solo da bacia de Fragosos a partir do mapa correspondente da bacia do Alto Rio Negro, que foi elaborado com imagens do Satélite Landsat/TM-5, referentes às órbitas 220/78, 221/78 e 22/79,

com data de fevereiro de 2009. Para as outras informações necessárias no uso das equações (6), (7) e (8), foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) da bacia de estudo, obtido das curvas de nível do mosaico correspondente a seis cartas topográficas digitais na escala de 1:50000, em projeção Universal Transversa de Mercator, datum SAD-69 e fuso 22S. No estado de Santa Catarina, cinco cartas foram utilizadas (Campo Alegre, São Miguel, Garuva, Pedra Branca do Araguaia e Tijucas do Sul), adquiridas do site da EPAGRI (2011) (<<http://www.epagri.sc.gov.br/>>). A carta MI 2857-3 que abrange o estado do Paraná foi adquirida do site do Instituto de Terras, Cartografia e Geociências da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná (2010)³.

Dessa maneira, o presente trabalho avaliou somente seis parâmetros para a calibração:

- R_{\max} : máxima capacidade de armazenamento pelo reservatório de intercepção [mm].

- I_0 : capacidade de infiltração do solo quando inicia a percolação [$\text{mm}/\Delta t$].

- I_b : capacidade de infiltração quando o solo está saturado [$\text{mm}/\Delta t$].

- $h = e^{-d}$, onde d é o parâmetro de decaimento da lei de infiltração [$1/\Delta t$].

- K_{sup} : constante do modelo de Reservatório Linear Simples para o caso do escoamento superficial [Δt].

- K_{sub} : constante do modelo de Reservatório Linear Simples para o caso do escoamento subterrâneo [Δt].

Com base nos trabalhos de Collischonn e Tucci (2001 e 2003), o presente

3 Disponível em: <<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=51>>.

trabalho considerou, na calibração, os limites máximos e mínimos dos parâmetros que são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Limites dos parâmetros do modelo IPH II

| Limite | I ₀ | I _b | h | K _{sup} | K _{sub} | R _{max} |
|--------|----------------|----------------|------|------------------|------------------|------------------|
| Mínimo | 10 | 0,1 | 0,01 | 0,01 | 10 | 0 |
| Máximo | 300 | 10 | 0,99 | 10 | 500 | 9 |

Como os dados disponíveis de chuva e vazão são diários, adotou-se um intervalo de tempo de um dia.

As condições iniciais do modelo foram:

- Percolação, $T = 17,4 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Escoamento superficial, $Q_{\text{sup}} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Escoamento subterrâneo, $Q_{\text{sub}} = 17,4 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Reservatório de interceptação, $R = 0 \text{ mm}$.

Considerou-se que Q_{sub} é igual ao valor médio da vazão inicial dos cinco eventos calibrados simultaneamente.

Foram utilizados dados de chuva das seis estações disponíveis no HidroWeb sistema de informações hidrológicas da ANA⁴. As características das estações estão resumidas na tabela 2.

⁴ Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>.

Tabela 2 – Estações pluviométricas utilizadas

| Estação | Localização | | Altitude [m] |
|-----------------------------------|-------------|------------|--------------|
| Fragosos (02649018) | 26°09'17"S | 49°22'50"W | 790 |
| Rio da Várzea dos Lima (02549003) | 25°57'00"S | 49°23'35"W | 810 |
| Vossoroça (02549008) | 25°49'00"S | 49°05'00"W | 805 |
| Garuva (02648027) | 26°02'08"S | 48°51'00"W | 80 |
| Pirabeiraba (02648033) | 26°10'48"S | 48°56'22"W | 1 |
| Campo Alegre (02649057) | 26°11'11"S | 49°16'24"W | 870 |

Utilizando as ferramentas de geoprocessamento calcularam-se os coeficientes de Thiessen dessas seis estações, com influência na bacia de Fragosos (Tabela

3). Esses dados foram utilizados para estimar as chuvas distribuídas na bacia para cada evento. Convencionalmente, neste trabalho, denomina-se essa chuva como chuva ponderada.

Tabela 3 – Coeficientes de Thiessen correspondentes aos seis postos pluviométricos com influência na bacia de Fragosos

| Nº | Estação | Área de influência [km ²] | Coeficiente de Thiessen [%] |
|----|------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1 | Fragosos | 119 | 15 |
| 2 | Pirabeiraba | 36 | 5 |
| 3 | Vossoroça | 134 | 17 |
| 4 | Rio da Várzea dos Lima | 84 | 11 |
| 5 | Campo Alegre | 359 | 45 |
| 6 | Garuva | 62 | 8 |
| | Total | 794 | 100 |

Os dados de vazão utilizados correspondem ao posto de Fragosos (Cód.: 65090000), localizado no exutório da bacia, também estão disponíveis no HidroWeb.

Cinco eventos foram escolhidos para calibração. O critério da escolha foi abranger

os casos que representem eventos extremos, com valores de vazão máxima maiores de 90 m³/s e com durações similares, neste caso 18 dias. Para validação foi escolhido o evento denominado E90 (Tabela 4).

No processo de escolha dos eventos,

Tabela 4 – Características dos eventos escolhidos

| Nome | Período [dia] | Chuva Max. [mm] | Vazão Max. [m ³ /s] | * |
|------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|---|
| E84 | 04/08/1984 ao 21/08/1984 | 61 | 91 | C |
| E87 | 12/02/1987 ao 01/03/1987 | 78 | 113 | C |
| E95 | 06/07/1995 ao 23/07/1995 | 94 | 125 | C |
| E99 | 02/07/1999 ao 19/07/1999 | 81 | 110 | C |
| E10 | 21/04/2010 ao 08/05/2010 | 86 | 152 | C |
| E90 | 14/07/1990 ao 12/08/1990 | 37 | 93 | V |

Nota: * Tipo de tratamento: C – Calibração.V – Validação.

observaram-se alguns casos de falta de consistência do hietograma com o hidrograma no caso da chuva observada no posto de Fragosos. Por esse motivo, adotou-se a chuva ponderada para a calibração.

Com respeito ao algoritmo de Metropolis Monte Carlo foi adotado o esquema de esfriamento do tipo potencial equação (5). Com $T_0 = 10000000000$ e $\alpha k = 0,97$. A longitude da cadeia de Markov $l_k = 90000$ e 2800 passos, obtendo-se um número máximo possível de iterações igual a 252000000.

Os critérios de desempenho do ajuste obtido na calibração foram os seguintes:

- Desvio de volumes de escoamento porcentual (DV%) - equação (9).
- Erro absoluto médio porcentual (absolute percent bias) (APB%) - equação (10).
- Erro absoluto médio (MAE) - equação (11).
- Erro médio (BIAS) - equação (12).

• Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) - equação (13).

• Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH) - equação (14).

• Coeficiente de determinação R².

$$DV\% = \frac{\sum_{i=1}^N (Vc_i - Vo_i)}{\sum_{i=1}^N Vo_i} \times 100 \quad (9)$$

$$APB\% = \frac{\sum_{i=1}^N |Vc_i - Vo_i|}{\sum_{i=1}^N Vo_i} \times 100 \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Vc_i - Vo_i|}{N} \quad (11)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{c_i} - V_{o_i})}{N} \quad (12)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{c_i} - V_{o_i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\text{NASH} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (V_{c_i} - V_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^N (V_{o_i} - V_{o_m})^2} \quad (14)$$

onde V_{c_i} é a vazão calculada no intervalo i ; V_{o_i} é a vazão observada no intervalo i ; N o é número de intervalos; e V_{o_m} é a vazão média observada.

Resultados

Com base no uso do geoprocessamento, estimaram-se o comprimento do rio principal $L = 99,1$ km, a área impermeável $IMP = 14,3$ km², aproximadamente 2% da área total e a declividade do rio principal $S = 0,00053$. Então, utilizando as equações (6), (7) e (8), os valores de T_c estimados foram aproximadamente igual a 54 h, 42 h e 20h, respectivamente. Portanto, considerando esses valores e também o fato de o intervalo de tempo de cálculo ser de um dia, o presente trabalho adotou dois dias como o valor do T_c .

A tabela 5 mostra o número de iterações (NI) realizadas durante a calibração

automática, a porcentagem de mudanças (M) do conjunto de parâmetros realizadas no processo de aceitação e rejeição, o tempo de cálculo (TCal) e o melhor valor obtido da função objetivo FO. A porcentagem de mudanças de conjunto de parâmetros é um valor importante para a regulação do esquema de esfriamento.

Tabela 5 – Características de cálculo numérico para calibração (NI = Número de iterações, %M = Porcentagem de mudanças, TCal = Tempo de cálculo e FO = Melhor valor da função objetivo)

| Evento | NI | % M | TC [seg] | FO |
|-------------------------------------|-----------|-----|----------|------|
| E84 | 159496351 | 24 | 4263 | 994 |
| E87 | 161763691 | 27 | 4729 | 2866 |
| E95 | 158655415 | 23 | 4696 | 852 |
| E99 | 158751281 | 23 | 4013 | 565 |
| E10 | 158390313 | 23 | 3985 | 1825 |
| Calibração simultânea dos 5 eventos | 158518817 | 23 | 19454 | 5009 |

Nota: NI = Número de iterações, %M = Porcentagem de mudanças, TC = Tempo de cálculo e FO = Melhor valor da função objetivo.

Os valores dos parâmetros do modelo IPH II, obtidos nos diferentes esquemas de calibração para os cinco eventos, apresentam-se na tabela 6. Observa-se uma grande variabilidade de alguns dos parâmetros como R_{max} que variou praticamente no intervalo entre o mínimo e o máximo.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros do modelo IPH II para cada calibração

| Evento | I ₀ [mm/dia] | I _b [mm/dia] | h [1/dia] | K _{sup} [dia] | K _{sub} [dia] | R _{max} [mm] | * |
|--------|-------------------------|-------------------------|-----------|------------------------|------------------------|-----------------------|---|
| E84 | 300 | 3,14 | 0,102 | 4,26 | 441 | 8,29 | I |
| E87 | 293 | 4,18 | 0,079 | 3,89 | 437 | 8,36 | I |
| E95 | 277 | 7,77 | 0,033 | 2,24 | 475 | 0,11 | I |
| E99 | 292 | 3,07 | 0,336 | 4,18 | 484 | 1,25 | I |
| E10 | 291 | 3,70 | 0,261 | 4,81 | 416 | 0,04 | I |
| Todos | 78 | 9,84 | 0,272 | 5,77 | 470 | 1,26 | S |
| Todos | 291 | 4,37 | 0,162 | 3,88 | 451 | 3,61 | M |

Nota: * Esquema de calibração: I = Individual, S = Simultâneo e M = Médio.

Na tabela 7, apresentam-se os valores do coeficiente de variação (CV) dos valores dos parâmetros obtidos na calibração individual (Tabela 6), onde se observa que os valores de CV de R_{max} e h são maiores.

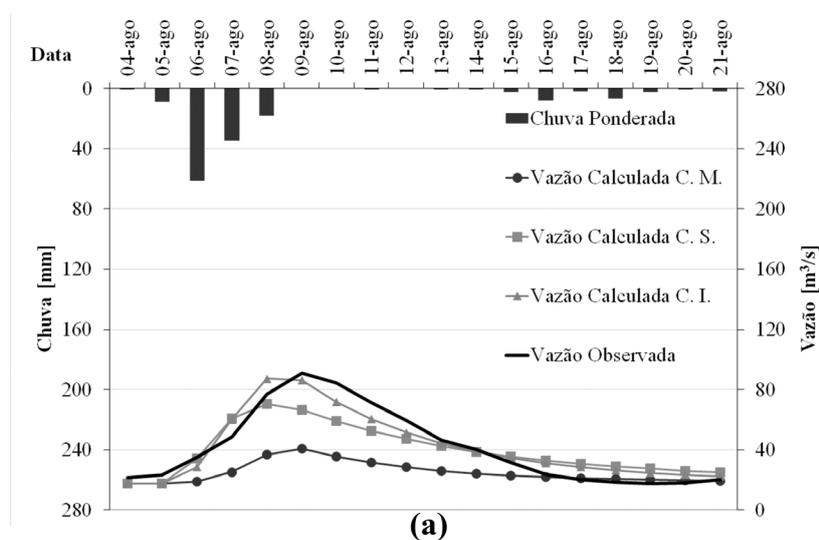
Tabela 7 – Coeficiente de variação dos valores dos parâmetros obtidos na calibração individual

| Parâmetro | I0 [mm/dia] | Ib [mm/dia] | h [1/dia] | Ksup [dia] | Ksub [dia] | Rmax [mm] |
|-----------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|-----------|
| CV (%) | 3 | 40 | 71 | 22 | 6 | 107 |

Na figura 4, apresentam-se os hietogramas e hidrogramas observados e calculados nas diferentes calibrações correspondentes aos eventos E84, E87, E95, E99 e E10. Nessa figura, os hietogramas correspondem à chuva ponderada dos seis postos pluviométricos. Os hidrogramas correspondem:

a) ao hidrograma observado no posto fluviométrico de Fragosos, b) ao hidrograma calculado com os parâmetros calibrados individualmente (CI), c) ao hidrograma obtido com a calibração simultânea (CS) dos cinco eventos e, d) ao hidrograma obtido com o valor médio (CM) dos parâmetros calibrados individualmente.

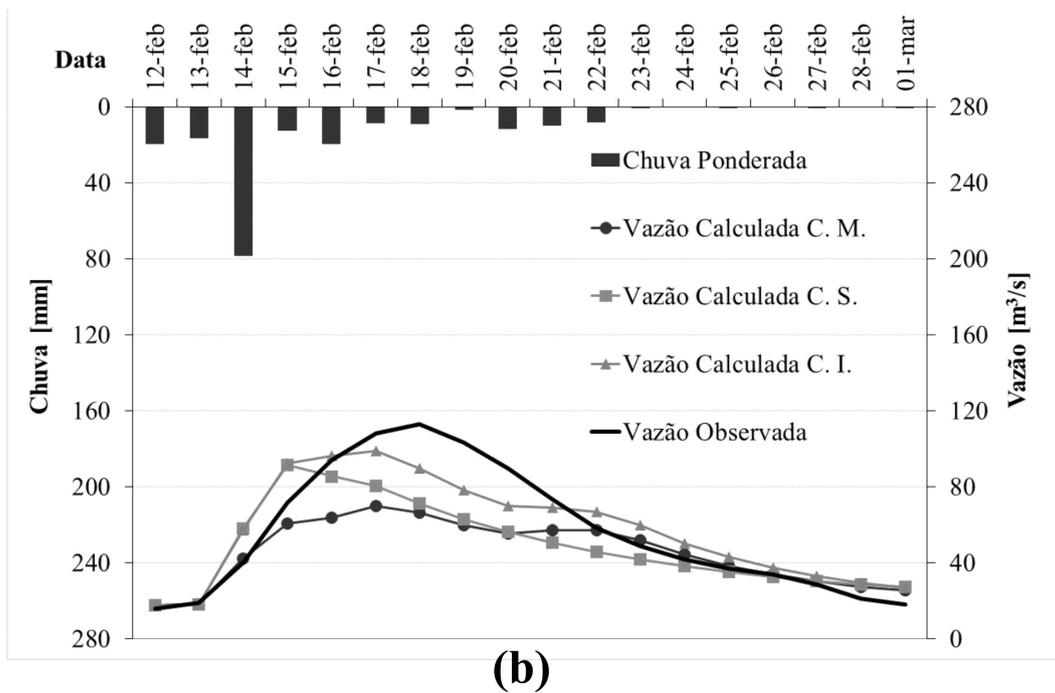
Figura 4 – Resultados das calibrações: (a) E84; (b) E87; (c) E95; (d) E99; e (e) E10



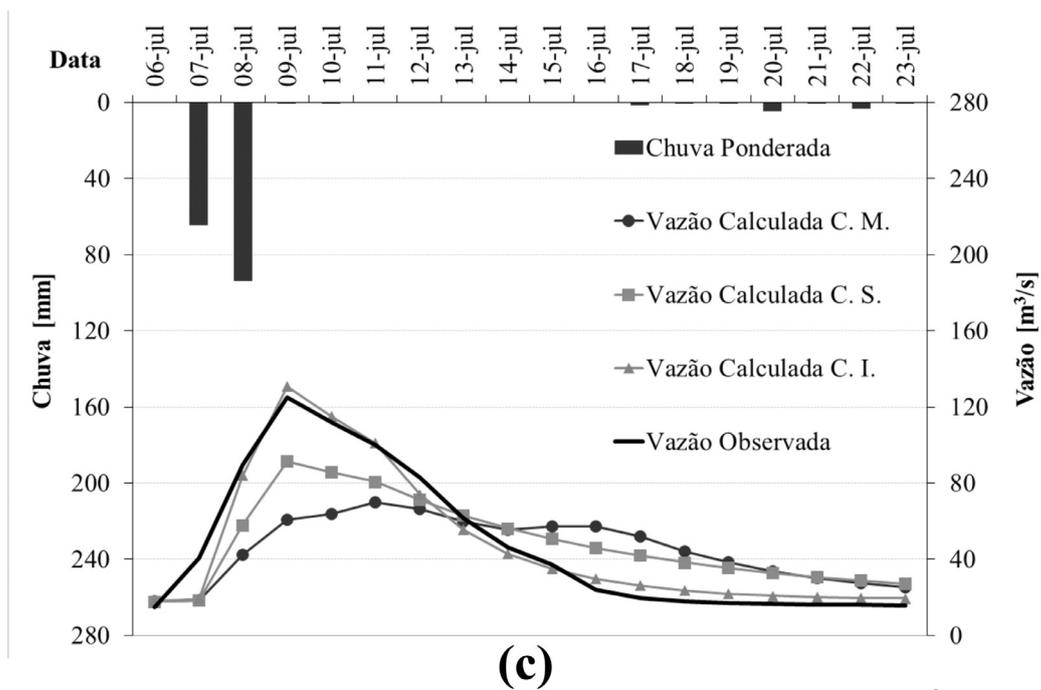
Continua...

Figura 4 – Resultados das calibrações: (a) E84; (b) E87; (c) E95; (d) E99; e (e) E10

...Continuação



(b)

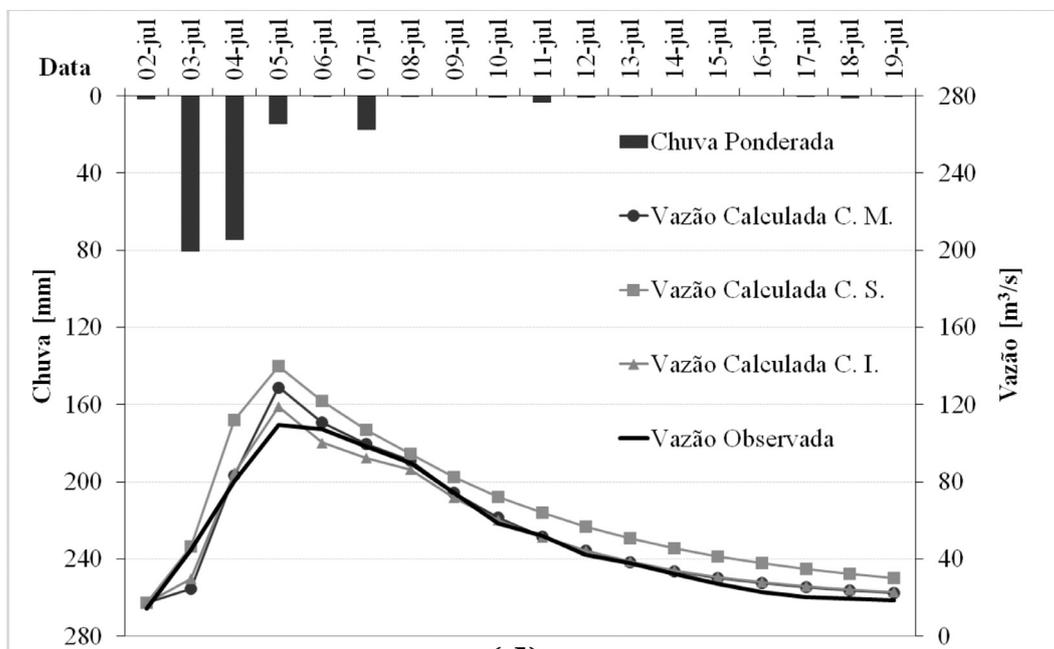


(c)

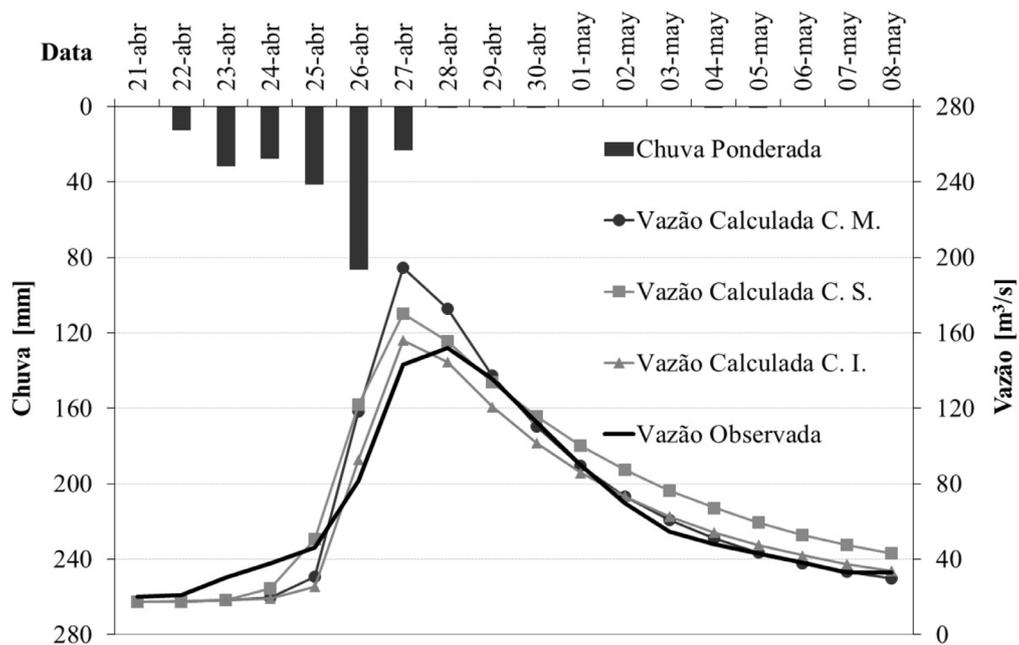
Continua...

Figura 4 – Resultados das calibrações: (a) E84; (b) E87; (c) E95; (d) E99; e (e) E10

...Conclusão



(d)

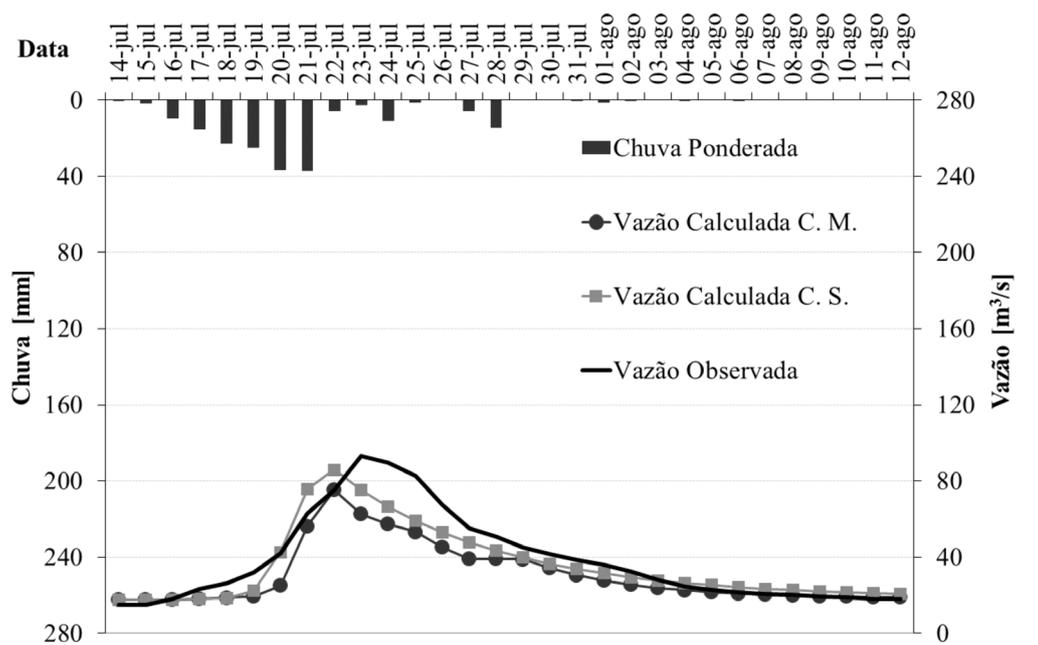


(e)

No caso de E10 e E99, os hidrogramas obtidos com o valor médio conseguem representar o hidrograma observado com boa performance e com valores similares aos obtidos com a calibração de eventos individuais. Porém, os casos de E84, E87 e E95 apresentam perda de volume, diferença do valor e posição da vazão máxima. Além disso, observa-se que os hidrogramas obtidos pela calibração dos eventos em forma simultânea são similares aos obtidos na calibração individual de cada evento, apresentando diferenças na posição e no valor da vazão pico, porém, sem grandes diferenças de volume.

A figura 5 apresenta o hietograma do E90 e seu hidrograma observado utilizado para validação dos conjuntos de parâmetros obtidos nos dois esquemas de calibração, também apresenta o hidrograma obtido com o conjunto de parâmetros da calibração simultânea (CS) e o hidrograma calculado usando o valor médio (CM) dos parâmetros obtidos com os cinco eventos. O conjunto de parâmetros obtidos com a calibração simultânea representa melhor o hidrograma observado comparado com o caso do conjunto de parâmetros obtidos com o valor médio dos parâmetros calibrados individualmente.

Figura 5 – Resultados das calibrações do evento E90



O desempenho do modelo na calibração está disposto na tabela 8 onde se apresentam, para cada evento, os valores de sete critérios de desempenho do ajuste correspondente. Os valores negativos de DV% correspondem aos casos de perda de

volume dos hidrogramas calculados com respeito ao hidrograma observado. Em geral, os piores casos correspondem ao esquema que utiliza o conjunto de parâmetros obtidos com o valor médio das calibrações individuais. Exemplo disso é a perda de volume de 40%

no E84, um valor de APV% igual a 50, um MAE igual a 24, um RMSE igual a 29, um Nash igual a 0,48 e um R² no E95. O evento E84 apresenta um valor de Nash igual a

-0,01. Para o caso do evento E90 utilizado na validação, os piores valores dos critérios de desempenho correspondem sempre ao conjunto de parâmetros do VM.

Tabela 8 – Valores obtidos nos critérios de desempenho do ajuste dos hidrogramas calculados respeito ao observado

| CDA | * | Evento | | | | | |
|----------------|----|--------|-------|------|-------|------|------|
| | | E84 | E87 | E95 | E99 | E10 | E90 |
| DV% | I | 1 | 2 | 1 | 1 | -3 | - |
| | S | -5 | -14 | 3 | 25 | 15 | -8 |
| | VM | -40 | -19 | -4 | 4 | 6 | -20 |
| APB% | I | 16 | 18 | 11 | 9 | 13 | - |
| | S | 19 | 21 | 30 | 21 | 17 | 17 |
| | VM | 42 | 24 | 50 | 9 | 15 | 21 |
| MAE | I | 7 | 10 | 5 | 5 | 8 | - |
| | S | 10 | 15 | 17 | 13 | 13 | 6 |
| | VM | 17 | 14 | 24 | 4 | 10 | 8 |
| BIAS | I | 0,4 | 1,0 | 0,1 | 0,7 | -2,1 | - |
| | S | -1,9 | -8,1 | 1,1 | 13,2 | 9,5 | -3,0 |
| | VM | -16,6 | -10,9 | -1,8 | -4,49 | 3,7 | -7,7 |
| RMSE | I | 7 | 13 | 7 | 6 | 10 | - |
| | S | 12 | 20 | 19 | 15 | 16 | 9 |
| | VM | 24 | 21 | 29 | 7 | 17 | 12 |
| NASH | I | 0,91 | 0,85 | 0,97 | 0,97 | 0,94 | - |
| | S | 0,76 | 0,64 | 0,77 | 0,77 | 0,85 | 0,85 |
| | VM | -0,01 | 0,57 | 0,48 | 0,95 | 0,83 | 0,71 |
| R ² | I | 0,91 | 0,87 | 0,97 | 0,97 | 0,95 | - |
| | S | 0,83 | 0,73 | 0,83 | 0,96 | 0,92 | 0,88 |
| | VM | 0,92 | 0,87 | 0,44 | 0,96 | 0,94 | 0,89 |

Nota: CDA = Critério de desempenho do ajuste. * Esquema de calibração: I = Individual, S = Simultâneo e VM = Valor médio.

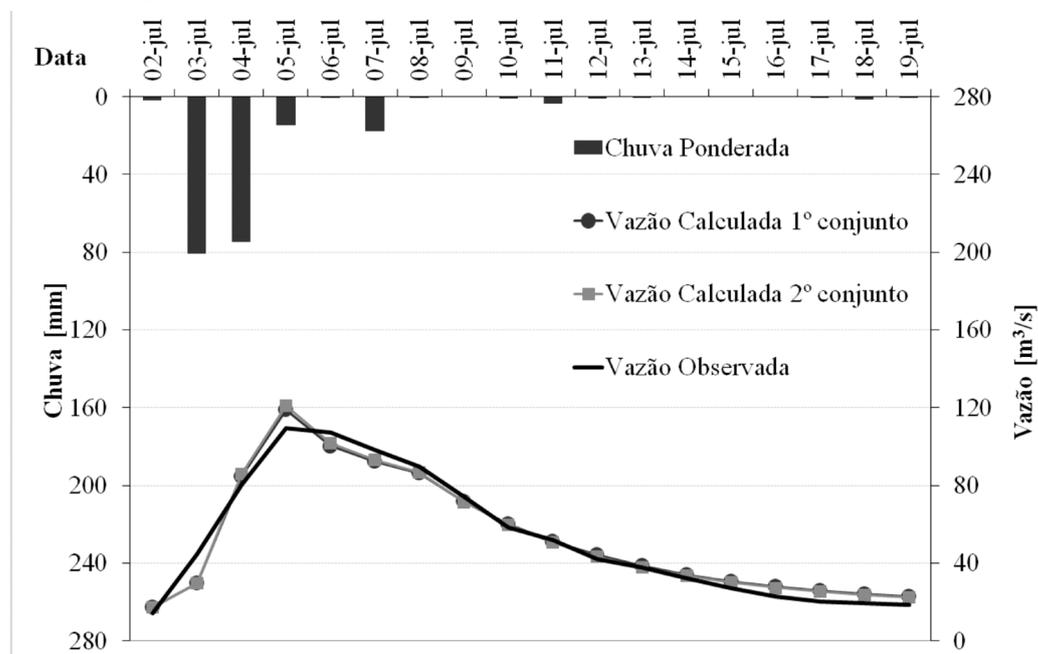
Na tabela 9 apresentam-se os dois melhores conjuntos de parâmetros obtidos na calibração do evento E99, na qual observa-se que os parâmetros que apresentam maior diferença são o R_{max}

e K_{sub}. Na figura 6 pode-se apreciar os hidrogramas correspondentes às simulações com os dois conjuntos de parâmetros mencionados na tabela 9 e o hidrograma observado do evento E99.

Tabela 9 – Valores dos dois melhores conjuntos dos parâmetros do modelo IPH II obtidos na calibração do E99

| Evento E99 | I_0 [mm/dia] | I_b [mm/dia] | h [1/dia] | K_{sup} [dia] | K_{sub} [dia] | R_{max} [mm] |
|---------------------------|----------------|----------------|-------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Melhor conjunto | 292 | 3,07 | 0,336 | 4,18 | 484 | 1,25 |
| 2º melhor conjunto | 284 | 3,19 | 0,327 | 4,06 | 440 | 0,14 |
| Diferença % | 3 | 4 | 3 | 3 | 9 | 89 |

Figura 6 – Resultados das calibrações do evento E99 com os dois melhores conjuntos de parâmetros obtidos



Os hidrogramas correspondentes aos dois conjuntos de parâmetros são muito similares entre si, além de serem representativos do hidrograma observado. Isso é consistente com o coeficiente de Nash-Sutcliffe que foi igual a 0,97 nos dois casos e o DV% para o caso do segundo melhor conjunto de parâmetros com respeito ao observado foi de 1,2%, sendo que o melhor conjunto foi de 1,3%.

Conclusões

Com algoritmo de Metropolis Monte Carlo aplicado ao modelo IPH II, foi possível obter conjuntos de parâmetros que ajustam bem o hidrograma observado na bacia Frágoso que se localiza na divisa entre os estados do Paraná e Santa Catarina. Porém, não foi encontrado um único conjunto capaz de ajustar todos os casos, ou

seja, um ótimo global.

Os resultados de calibração mostraram uma tendência onde é mais apropriado utilizar o conjunto de valores dos parâmetros obtidos utilizando a calibração simultânea do que o conjunto de parâmetros resultante de aplicar o valor médio dos parâmetros calibrados dos eventos individuais.

A variabilidade de alguns parâmetros

nos distintos conjuntos obtidos em diferentes calibrações demonstra que não é importante o valor isolado de cada parâmetro, mas sim a combinação deles. Esta grande variabilidade que apresenta os valores dos parâmetros justifica a utilização da calibração automática, já que a escolha destes em uma calibração manual ou baseada na literatura seria uma tarefa difícil e complicada.

Referências

AARTS, E. H. L.; KORST, J. **Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing**. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1989.

BEARD, L. **Optimization Techniques for Hydrologic Engineering**. Davis Ca., 1966. Technical Paper N.2, Hydrologic Engineer Center.

BERTONI, J.C. **Etude hydrologique et analyse des incertitudes sur trois bassins versants semi urbanisés de la région centrale d'Argentine**. Montpellier II, 2001. Univ. 303 f. These de Doctorat.

BERTONI, J.C. **Hidrología Avanzada**. Córdoba, Argentina, 2003. Notas de clases del curso del Postgrado. Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención en Recursos Hídricos FCEfyN - Universidad Nacional de Córdoba.

CLARKE, R.T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. **Journal of Hydrology**, v.19, p.1-20, 1973.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Calibração automática global do modelo IPH II. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracaju SE. **Anais...** Aracaju: 2001. 1 CD-ROM.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.3, p.27-39, 2003.

DEL PRETE, P. G. **Implementación del Algoritmo de Metropolis Monte Carlo para el Ajuste Automático de un Modelo Hidrológico: Ensayos con Datos Sintéticos y Reales**. Córdoba, Argentina, 2009. Tesis de Maestría – Mención en Recursos Hídricos. FCEfyN – UNC.

DOWSLAND K. A.; DÍAZ B. A. Heuristic design and fundamentals of the Simulated Annealing. Inteligencia Artificial. **Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial**, n.19, p.93-102, 2003.

GERMANO A.; TUCCI C. E. M.; DA SILVEIRA A. L. L. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.3, n.4, p.103-120, 1998.

GIGLIO J. N.; KOBİYAMA, M. Flood areas characteristics in Rio Negrinho city, southern Brazil. In: 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre. **Proceedings...** 2011. 8p.

IBBIT, R. P. **Systematic parameter fitting for conceptual models of catchment hydrology**. London, 1970. Ph.D. dissertation, Imperial College of Science and Technology, University of London.

KIRKPATRICK, S.; GELATT C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, v.220, n.4598, p.671-681, 1983.

KIRPICH, Z. P. Time of concentration of small agricultural watersheds. **Civil Engineering**, v.10, n.6, p.362, 1940.

KOBİYAMA, M.; CHAFFE, P. L. B.; ROCHA, H. L.; CORSEUIL, C. W.; MALUTTA, S. GIGLIO, J. N.; MOTA, A. A.; SANTOS, I. RIBAS JUNIOR, U. e LANGA, R. Implementation of school catchments network for water resources management of the Upper Negro River region, southern Brazil. In: Taniguchi M, Burnett WC, Fukushima Y, Haigh M, Umezawa Y. (Ed.). **From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management**, London: Taylor & Francis Group, 2009. p.151-157.

MALUTTA, S.; KOBİYAMA, M. SWAT application to analyze the floods in Negrinho River basin - SC, Brazil. In: 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre. **Proceedings...** 2011. 8p.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H. e TELLER, E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. **Journal of Chemical Physics**, v.21, p.1087-1092, 1953.

PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: Tucci, C.E.M.; Porto, R. L. L. e Barros, M. T. (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre – RS: ABRH, UFRGS, 1995. p.107-165.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical Recipes in FORTRAN 90**. Cambridge: Cambridge University, 1996.

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.7, n.4, p.270-292, 2002.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. In: TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH. UFRGS, 1998. p.669.

TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES, M. L. Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II. Alguns Resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS – ABRH, 4., 1981, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: 1981.

USACE-HEC. **Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.5** – User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2010. 318p.

VAN LAARHOWEN, P. J. M.; AARTS, E. H .L. **Simulated annealing**: theory and applications. Norwell, Massachusetts: D. Reidel, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, 1987.

VRUGT, J. A.; GUPTA, H. V.; BASTIDAS, L. A.; BOUTEN, W.; SOROOSHIAN, S. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. **Water Resources Research**, v.39, n.8, p.5-1a5-19, 2003.