



XIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE INCERTEZA DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA AMBIENTE URBANO

*Tatiane Souza Rodrigues Pereira¹; Aline de Arvelos Salgado² & Klebber Teodomiro Martins
Formiga³*

RESUMO – Neste artigo são avaliadas as incertezas associadas às estimativas dos conjuntos de parâmetros do modelo conceitual chuva-vazão UFGModel1.1 por meio do método GLUE, que emprega técnicas de inferência bayesiana informais via simulações de Monte Carlo. A Bacia Hidrográfica do Córrego Cascavel, localizada no município de Goiânia, Goiás, foi selecionada para o desenvolvimento do estudo. Os resultados demonstraram que a abordagem bayesiana, mesmo de caráter informal, revelou-se adequada aos objetivos propostos, reforçando a importância de haver avaliação das incertezas associadas aos resultados das simulações por modelos hidrológicos.

ABSTRACT – In this article are evaluated the uncertainties associated the estimates of sets parameter the conceptual model rainfall-runoff UFGModel1.1 through the GLUE method, employing techniques of informal Bayesian inference via Monte Carlo simulations. The Hydrographic Basin Rattlesnake Creek, located in the city of Goiânia, Goiás, was selected to develop the study. The results showed that the Bayesian approach, even informally, proved adequate to the proposed objectives, reinforcing the importance of having assessment of the uncertainties associated with the results of the simulations for hydrological models.

Palavras-Chave – Algoritmo estatístico, Córrego Cascavel, modelo chuva-vazão.

1) Afiliação: Doutoranda em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás – CIAMB/UFG, Campus Samambaia, Avenida Esperança, s/n, Goiânia-GO, CEP 74690-900, (062) 3521-1024, tatiane.srp@hotmail.com

2) Afiliação: Doutoranda em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás – CIAMB/UFG, Campus Samambaia, Avenida Esperança, s/n, Goiânia-GO, CEP 74690-900, (062) 3521-1024, alinearvelos@hotmail.com

3) Afiliação: Dr. Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás - EECA/UFG, R. 235, s/n - Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, 74605-050, (62) 3209-6084, klebber.formiga@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os modelos hidrológicos de chuva-vazão têm sido amplamente utilizados para simular o comportamento do escoamento superficial e das drenagens frente às contínuas alterações do uso e ocupação do solo. Isso porque, apesar das razões para o desenvolvimento e aplicação destes modelos serem diversas eles têm sido indicados como uma importante ferramenta de suporte ao planejamento e gestão, devido à possibilidade da prospecção de cenários futuros e pela flexibilidade na alteração das variáveis e dos parâmetros que caracterizam certa bacia hidrográfica (Beven, 2012).

Para que os parâmetros determinados pela modelagem sejam considerados confiáveis e que estes possam ser utilizados para simulações, é necessário realizar procedimentos de calibração do modelo. No entanto, o ajuste dos parâmetros de um modelo hidrológico é uma etapa que envolve maior esforço para seu usuário, devido à necessidade de maior entendimento do comportamento do modelo e dos parâmetros e aos problemas com a qualidade e representatividade dos dados hidrológicos (Collischonn e Tucci, 2003).

Assim, a calibração deve ser realizada de modo que as previsões de vazões do modelo aproximem-se de forma consistente como possível resposta das vazões observadas, e as incertezas sejam quantificadas numericamente pela análise das incertezas nas simulações de validação (Vrugt *et al.*, 2008). Sendo que esta última, segundo Montanari (2011), é na época atual uma das áreas de pesquisa mais ativas em hidrologia, tendo sido foco de muitas discussões nos últimos anos (Sirorska *et al.*, 2012; Sadegh e Vrugt, 2013; Sun e Bertrand-Krajweski, 2013; Dotto *et al.*, 2014). Além do que, os modelos que vêm tendo maior aceitabilidade são aqueles que têm empregado a análise de incerteza na determinação dos parâmetros.

Dessa forma, um método bastante utilizado atualmente que visa extrapolar estimativas fiáveis das incertezas ligadas as previsões dos modelos, é o método da Probabilidade Generalizada da Estimativa de Incerteza (GLUE), proposto por Beven e Binley (1992), que desde sua introdução, tem sido amplamente aplicado em diversos campos de estudo (Vrugt *et al.*, 2008).

Isso posto, o objetivo aqui é adquirir uma melhor compreensão do modelo de eventos UFGModel1.1 proposto, bem como avaliar o seu desempenho com ênfase na identificação dos parâmetros e análise de incerteza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Córrego Cascavel está localizada no Estado de Goiás, especificamente, nas porções das regiões sul e central no município de Goiânia, e possui área de drenagem de 34,27km², conforme Figura 1. Esta bacia possui exutório no Ribeirão Anicuns,

afluente do Rio Meia Ponte, que se destaca necessariamente por constituir a rede hidrográfica de Goiânia.

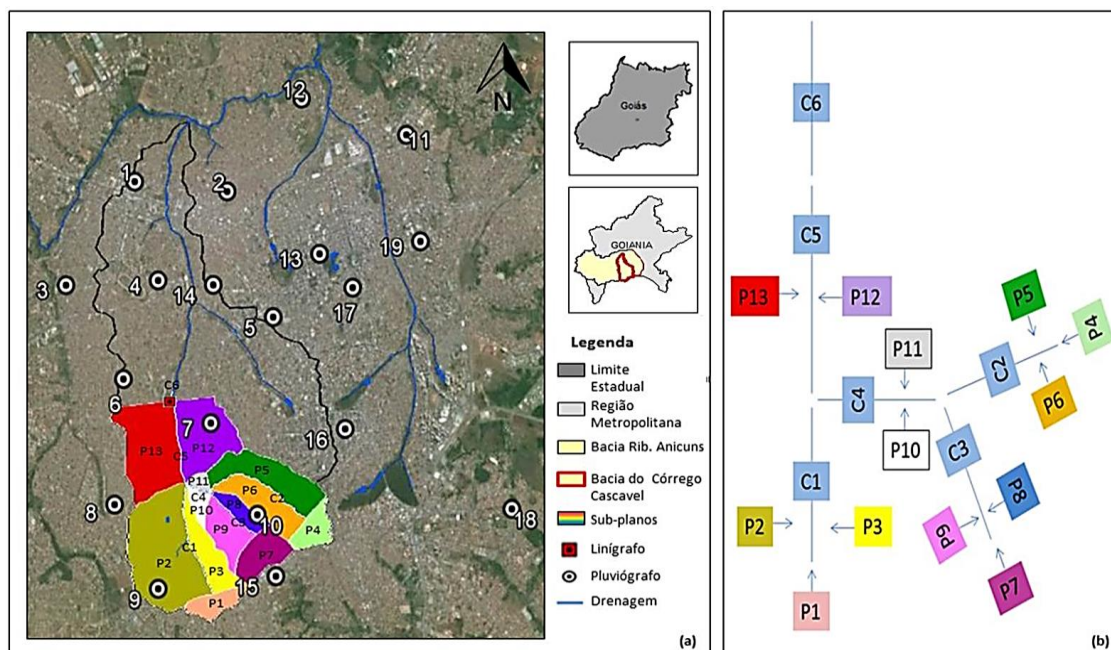


Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Córrego Cascavel e das estações de medição. (a) Discretização espacial utilizada na modelagem e (b) Representação esquemática da discretização das áreas em sub-planos e canais.

A Bacia Hidrográfica do Córrego Cascavel é composta pelos córregos Mingau, Serrinha e Vaca Brava pela margem direita, e pela margem esquerda, o Córrego D'Água. A região desta bacia é marcada pela presença elevada de edificações urbanas, comerciais e industriais, além de ruas e avenidas pavimentadas. Poucas regiões apresentam alguma forma de vegetação, como é observado nos parques e nos remanescentes isolados de mata ciliar. Cabe salientar ainda, que vários trechos do córrego encontram-se canalizados por estruturas de concreto e gabião.

2.2 UFGModel1.1

No estudo, o modelo UFGModel1.1 é utilizado. O UFGModel1.1 é um modelo de chuva-vazão parcimonioso com base no método da onda cinemática, cujos parâmetros são pensados para variar entre bacias hidrográficas. Este modelo foi desenvolvido inicialmente por Seibt (2013), modificado por Marques (2014) e Pereira (2015), e atualmente, tem sido utilizado para sua avaliação em termos de previsões e calibração em estudos locais na região do município de Goiânia para bacias hidrográficas urbanas.

Na configuração atual, o UFGModel1.1 possui quatro parâmetros (Coeficiente de rugosidade Manning para área permeável, Coeficiente de rugosidade Manning para o canal, Perda inicial e Curva número), em que as faixas de variação necessitam ser especificadas pelo usuário. Nesse estudo, foram adotadas respectivamente as faixas de incerteza de: 0,025 a 0,080s.m-1/3, 0,013 a

0,200s.m-1/3, 1,00 a 30,00mm e 20,00 - 100,00. O modelo considera como dados de entrada a precipitação média para as áreas dos planos ou dos sub-planos, obtidas pelo Método Mutiquadric de Barbalho (2011), e como dados de saída, as vazões, estimadas para os planos ou sub-planos e canais.

2.3 Problema inverso

Foi aplicado o algoritmo de inferência bayesiana informal GLUE (Probabilidade Generalizada da Estimativa de Incerteza) para estimação dos parâmetros e análise de incerteza das previsões de vazões do modelo conceitual de bacias hidrográficas distribuído UFGModel1.1.

Para tanto, a Bacia Hidrográfica do Córrego Cascavel foi discretizada espacialmente em treze sub-planos e seis canais, para melhor representação dos processos hidrológicos envolvidos, conforme Figura 1.

As características físicas dos sub-planos foram extraídas por meio de ortofotos e de Modelo Digital de Elevação (MDE), subproduto dos dados do LiDAR (Light Detection and Ranging), com resolução de um metro (Tabela 1). Para tanto, foram realizados processos de filtragem a partir da mistura de informações da vegetação, de edificações etc, para que fossem retiradas as medições indesejadas e então encontrar as superfícies que representassem adequadamente o terreno.

Tabela 1 - Características físicas dos sub-planos.

	Sub-plano	Área (km ²)	Declividade (m/m)	Área Permeável (km ²)	Área Impermeável (km ²)	Comprimento Médio (m)
Planos	P1	0,56	0,0315	0,02	0,54	385,78
	P2	3,47	0,0421	0,73	2,73	1397,07
	P3	1,01	0,0429	0,03	0,99	456,38
	P4	0,59	0,0320	0,00	0,59	554,75
	P5	1,62	0,0427	0,04	1,58	572,53
	P6	1,18	0,0381	0,10	1,08	581,51
	P7	0,90	0,0392	0,00	0,90	693,46
	P8	0,46	0,0394	0,00	0,46	379,15
	P9	0,89	0,0374	0,08	0,81	705,38
	P10	0,26	0,0374	0,04	0,22	401,43
	P11	0,15	0,0427	0,00	0,15	309,97
	P12	1,85	0,0367	0,00	1,85	1324,54
	P13	2,47	0,0336	0,08	2,39	1234,86

As características físicas dos canais (Tabela 2) foram extraídas por meio de levantamento planialtimétrico, pela utilização do equipamento GPS RTK Trimble R6 e por ortofotos digitais.

Tabela 2 - Características físicas dos canais.

Canais	Canal	Comprimento (m)	Inclinação (m/m)	Largura Média (m)
	1	2759	0,017	7
2	2843	0,023	8	
3	1439	0,028	6	
4	679	0,015	10	
5	1831	0,013	14	
6	200	0,005	14	

Para aplicação e análise dos resultados do GLUE, foram utilizados dados do monitoramento pluviométrico e fluviométrico dos anos de 2013 e 2014 realizados para a Bacia Hidrográfica do Córrego Cascavel. Os dados consistem em precipitação (mm/min) e vazão (m³/s), e são produtos da rede de monitoramento em funcionamento desde 2011, composta por dezenove pluviógrafos e dois linígrafos (Figura 1).

Para os sub-planos de captação, foram selecionados os oito eventos mais representativos para o estudo. Em que quatro deles são utilizados para efeito de calibração (eventos 1, 2, 3 e 4), ao passo que e os outros quatro, são utilizados para validação (eventos 5, 6, 7 e 8), conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização dos eventos selecionados em intensidades, volumes e vazões.

Evento/Data/ Classificação do evento	Intensidade Máxima (mm/min.)	Intensidade Média (mm/min.)	Volume Total (mm)	Vazão Máxima (m ³ /s)	Vazão Média (m ³ /s)	Volume Total (m ³)
1 (29/11/2013) Médio à forte	2,33	0,40	38,74	87,27	30,44	3561,36
2 (08/12/2013) Fraco	1,01	0,19	29,92	62,10	21,80	3030,76
3 (12/12/2013) Forte	2,23	0,69	70,32	150	62,50	8438,18
4 (24/03/2014) Fraco	0,88	0,24	21,47	49,46	21,42	1756,67
5 (22/12/2013) Fraco	0,88	0,29	33,86	42,23	21,73	3217,06
6 (24/01/2014) Médio	1,08	0,38	23,97	38,13	19,85	1488,85
7 (16/02/2014) Fraco	0,62	0,16	46,57	45,05	19,95	4550,00
8 (18/03/2014) Médio à fraco	1,25	0,30	27,90	58,74	28,33	2663,58

Para quantificar os erros relativos à diferença entre os parâmetros medidos e àqueles previstos pelo UFGModel1.1, adotou-se como função objetivo, o coeficiente de eNS de Nash e Sutcliffe (1970), conforme equação (1). Assim, foram realizadas com o GLUE um total de 5.000 avaliações do modelo utilizando faixas anteriores uniformes sobre o hiper-cubo especificado para as faixas de incertezas, adotando um limiar de corte para definição dos conjuntos de parâmetros ótimos ou comportamentais de $\geq 0,76$.

$$E(\theta) = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (\sigma(t) - \hat{\sigma}(t|\theta))^2}{\sum_{t=1}^N (\sigma(t) - \sigma)^2} \quad (1)$$

Em que $E(\theta)$ é o coeficiente de eNS para o conjunto de parâmetros θ ; $\sigma(t)$ é a variável observada no passo de tempo t ; $\hat{\sigma}(t|\theta)$ é a variável calculada para o instante t , usando o conjunto de parâmetros posterior θ ; σ é o valor médio da variável observada; e N é o número de intervalos de tempo (tamanho do evento analisado).

Dessa forma, de acordo com Pereira (2015), as etapas utilizadas para aplicação do método GLUE é descrito:

- i. Determinou-se uma série de conjuntos de parâmetros θ de tamanho v (5000) empregado uma distribuição prévia de probabilidades para os parâmetros do conjunto $p(\theta)$, que neste caso foi usada uma distribuição uniforme, e foram consideradas faixas superiores e inferiores para cada parâmetro;
- ii. Calculou-se a probabilidade de $E(\theta)$ (Equação 4.21) de cada conjunto $\theta = 1, \dots, v$;
- iii. Definiu-se um limite de corte de 0,76, para separar soluções-comportamentais de não-comportamentais a partir da combinações de parâmetros;
- iv. Normalizou-se os valores de máxima verossimilhança das soluções comportamentais;
- v. Atribuiu-se a cada conjunto de parâmetro de previsão de saída (conjunto de parâmetro anterior) a probabilidade pela aplicação do Método de Monte Carlo, gerando conjuntos de parâmetros posteriores;
- vi. Organizou-se os conjunto de parâmetros posteriores com suas probabilidades correspondentes para criar a fdp (função de densidade de probabilidade) da previsão de saída do modelo, e usá-la para gerar intervalos de incerteza; e
- vii. Determinou-se a faixa de vazões esperadas considerando a incerteza estimada no limite de corte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os histogramas dos parâmetros do UFGModel1.1 são apresentados na Figura 2 para os quatro eventos da calibração, em que o eixo X representa a faixa de variação de cada parâmetro individual, e as frequências marginais das 5.000 soluções comportamentais que tiveram um valor de eNS superior ou igual a 0,76 são apresentadas. Verifica-se que o GLUE apresenta distribuição de parâmetros que são muito amplos e abrangem uma grande parte do espaço de soluções, em que a curva é quase Gaussiana.

A mediana da previsão dos valores de Manning do plano, CN, Ia e Manning do canal, encontrados pelo GLUE respectivamente, para cada evento selecionado na calibração foram: Ev.01. (0,03; 95; 11; 0,1), Ev.02 (0,015; 87; 2,0; 0,09), Ev.03 (0,035; 88; 5,0; 0,08) e Ev.04 (0,04; 96; 3,0; 0,16).

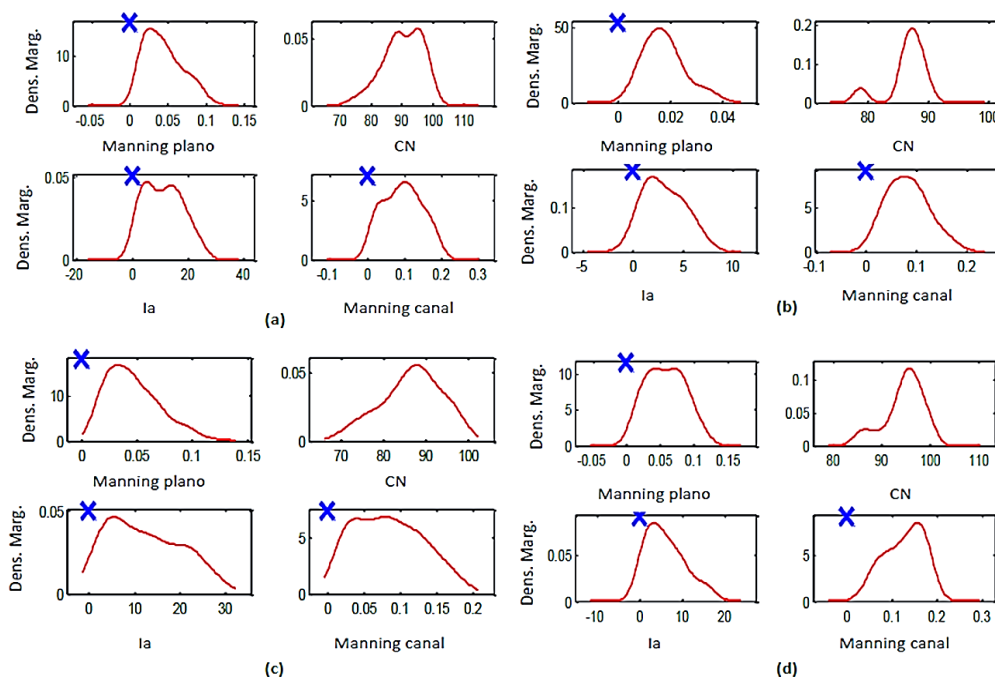


Figura 2 - Histogramas dos parâmetros da calibração do modelo UFGModel1 inferidas utilizando a função de probabilidade eNS para os Eventos: 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Embora individualmente cada evento tenha apresentado um bom ajuste, observa-se que os valores dos parâmetros encontrados para estes apresentam variação significativa, principalmente para os coeficientes de Manning do plano. Isso ocorre pela forma como o modelo representa a bacia como um plano, sendo que a bacia fisicamente seria composta por planos e condutos da rede de drenagem.

Para o Evento 3, o mais extremo, ocorre provavelmente maior escoamento pela superfície, uma vez que o sistema de drenagem, como é comum no Brasil, é incapaz de absorver toda a água gerada no escoamento, fazendo com que esta ocorra na maior parte do tempo por inúmeras superfícies, o que acarreta em um Manning do plano maior, em torno de 0,35.

O Evento 4 é um evento fraco, porém apresentou valores altos para o Manning do plano, próximos aos valores do evento mais extremo e maiores que os demais eventos. Esse fato pode ser explicado devido a precipitação do Evento 4 ter ocorrido de forma menos distribuída, em que os maiores valores pluviométricos se concentraram nos sub-planos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 da bacia. Verificou-se também, que houve eventos de chuvas antecedentes, assim o solo estaria muito úmido, contribuindo para o escoamento, o que também explica os valores altos de CN. Além disso, por ser um modelo de evento, não se tem a condição inicial de umidade do solo, sendo que o valor CN é dependente da chuva anterior.

Logo para os eventos 1 (Médio à forte) e 2 (Fraco), apesar de um ser um evento mais forte que o Evento 04 (Fraco) e o outro ser um evento de mesma característica, verificou-se que as chuvas ocorreram de forma mais distribuída em toda a bacia, ou seja, a precipitação ocorreu de

forma quase igualitária nos planos. Dessa forma, a rede de drenagem já consegue transportar uma maior porção do escoamento, acarretando maiores velocidades e consequentemente, menores valores de Manning do plano.

Os valores de CN e Ia foram semelhantes na maior parte do tempo para praticamente todos os eventos, indicando que o modelo de infiltração atendeu satisfatoriamente aos diferentes eventos.

O Manning do canal foi o que apresentou maior variação nos resultados, indicando que o modelo é menos sensível a este parâmetro, pois não ocorre tanta alteração na função de verossimilhança quando se altera o seu valor. Isto pode ser explicado fisicamente porque o trecho de canal desta bacia é relativamente pequeno, tendo pouca influência no formato do hidrograma.

De forma geral, as previsões do modelo UFGModel1.1 mostraram acompanhar bem as observações de vazões quando utilizado o GLUE, embora tenha superestimado a incerteza real observada nos dados da calibração.

A superestimação da incerteza real também ocorreu para a maioria dos eventos validados, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

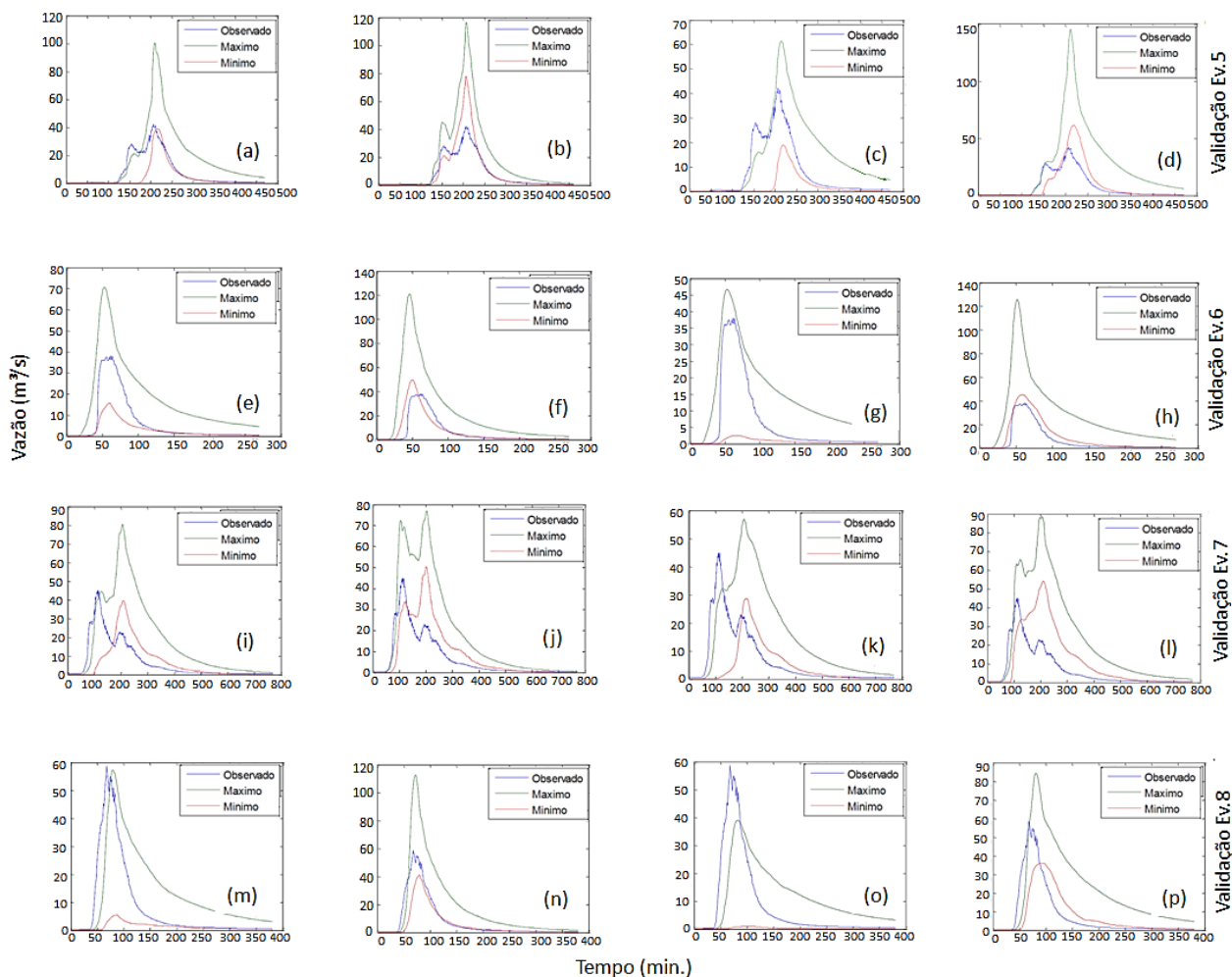


Figura 3 – Hidrogramas das vazões simuladas para os Eventos 5, 6, 7 e 8, com os conjuntos de parâmetros dos Eventos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, encontrados na calibração pelo GLUE e intervalos de incerteza.

A superestimação da incerteza real também ocorreu para a maioria dos eventos validados, Figura 3 (a, c, e, g, m, n e p), em que se obtiveram faixas de incerteza preditivas totais de aproximadamente 65, 42, 57, 44, 55, 70 e 50m³/s, respectivamente, referentes aos eventos 5, 6 e 8. Pode-se verificar ainda que houve superestimação da faixa de mínima, Figura 3 (b, d e f) e superestimação da faixa de máxima, Figura 3 (o).

Não houve validação satisfatória para o evento 7 com os conjuntos de parâmetros dos eventos 1, 2, 3 e 4, o mesmo correndo para o evento 5 para os conjuntos de parâmetros dos eventos 2 e 4. Verifica-se que existem desvios entre os picos dos hidrogramas, devido a estes eventos apresentarem valores de vazões distintos para as subidas e descidas dos hidrogramas, conforme Figura 3 (i, j, k, l, b e d).

Tais resultados indicam que o UFGModel1.1 funciona bem para eventos de médio a fortes, não correndo o mesmo para eventos fracos ou eventos de mais de um pico. Como é considerado um modelo de eventos, verifica-se que parâmetros derivados de eventos de médio a fortes tendem a validar satisfatoriamente eventos semelhantes. Apesar de que as avaliações com eventos fracos e de mais de um pico mostraram potencial para simulações, indicando que eventos com essas características devem ser mais bem investigados.

4. CONCLUSÕES

O UFGModel1.1 apresentou nesta versão somente 4 parâmetros, obedecendo além da equifinalidade, a parcimônia, portanto é um modelo bastante enxuto. O modelo calibrado ajustou de maneira aceitável os dados observados, visto que a eficiência atingida foi satisfatória na validação.

O estudo mostrou ser capaz de identificar abordagens capazes de fornecer resultados relativamente confiáveis de modelagem, quando poucos dados estão disponíveis, o que é muito comum para pequenas bacias urbanas, fato que tende a inviabilizar estudos ligados a hidrologia. Recomenda-se a simulação com mais eventos para verificar se seriam obtidos resultados melhores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos seguintes órgãos e seus respectivos funcionários, pelo apoio institucional, financeiro e/ou logístico: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Apoio a Pesquisa (FUNAPE), Fundação de Desenvolvimento da Unicamp (FUNCAMP) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

BIBLIOGRAFIA

- BARBALHO, F.D. (2011). “Método para a determinação do fator de redução de área em bacias urbanas”. in: *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós – Graduação Stricto sensu em Engenharia do Meio Ambiente*. Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, pp.1-76.
- BEVEN, K. (2012). *Rainfall-runoff modeling: the primer*. 2nd ed. Chichester: John Wiley. pp. 14.
- BEVEN, K.J.; BENLEY, A. (1992). “The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction”. *Hydrological Processes*, 6, pp.279-298.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E M. (2003) “Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*, 8(3), pp.27-39.
- DOTTO, C.B.S.; KLEIDORFER, M.; DELETIC, A.; RAUCH, W.; MCCARTHY, D.T. (2014). “Impacts of measured data uncertainty on urban storm water models”. *Journal Hydrology*, 508, p. 28-42.
- MARQUES, R.S. (2014). “Modelo hidrológico unidimensional para bacias hidrográficas peri-urbanas”. in: *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente*. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, pp.1-93.
- MONTANARI, A. (2011). “Uncertainty of Hydrological Predictions”. in: *Treatise on Water Science*. Org. Wilderer, P., Oxford: Academic Press, pp. 459-478.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles”. *Journal of Hydrology*, 10 (3), pp.282–290.
- PEREIRA, T.S.R. (2015). “Modelagem e Monitoramento Hidrológico das Bacias Hidrográficas dos Córregos Botafogo e cascavel, Goiânia – GO”. in: *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente*. Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia – GO, pp.1-133.
- SADEGH, M.; VRUGT, J.A. (2013). “Bridging the gap between GLUE and formal statistical approaches: approximate Bayesian computation”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), pp.4831–4850.
- SEIBT, A.C. (2013). “Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo – Goiânia, GO”. in: *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente*. Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia – GO, pp.1-145.
- SIRORSKA, A.; SCHEIDEGGER, A.; BANASIK, K.; RIECKERMANN, J. (2012). “Bayesian uncertainty assessment of flood predictions in ungauged urban basins of conceptual rainfall-runoff models”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), pp.1221-1236.
- SUN, S.; BERTRAND-KRAJWESKI, J.L. (2013). “Separately accounting for uncertainties in rainfall and runoff: Calibration of event-based conceptual hydrological models in small urban catchments using Bayesian method”. *Water Resources Research*, 49(9), pp. 5381- 5394.
- VRUGT, J.A.; TER BRAAK, C.J.F.; GUPTA, H.V.; ROBINSON, B.A. (2008). “Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling?”. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(7), pp.1011-1026.