



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

MODELAGEM HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL DAS ZONAS URBANAS INUNDÁVEIS EM COLATINA / ES

Marlon Marques Coutinho¹ & Éber José de Andrade Pinto²

RESUMO – Uma das aplicações da modelagem hidráulica é o estudo de inundações urbanas principalmente como ferramenta de gestão de riscos. De uma forma geral os modelos hidráulicos são calibrados com um determinado evento e o conjunto de parâmetros é utilizado na previsão de outros eventos de maior magnitude. O questionamento inerente à situação é saber se os parâmetros calibrados serão adequados para a previsão dos outros eventos de maior magnitude. Neste contexto foram utilizados os mapeamentos das áreas inundadas por dois eventos de cheia ocorridos em dezembro de 2013 em Colatina-ES, um com 13 anos e outro com 71 anos de tempo de retorno. O HEC-RAS, considerando o escoamento permanente, foi calibrado com o evento de 13 anos e verificado se o conjunto de parâmetros permitiria a reprodução da mancha de cheia mapeada do evento de 71 anos. Os resultados mostraram que o conjunto de parâmetros calibrado pode ser utilizado para simular eventos de maior magnitude. Assim, o HEC-RAS foi utilizado para prever a extensão da inundação, considerando as atuais condições de uso e ocupação do solo, caso se repita a vazão máxima ocorrida em 1979, em Colatina-ES, a qual está associada a um tempo de retorno de 327 anos.

ABSTRACT– Hydraulic modeling has been increasingly employed in the study of urban flooding primarily as a risk management tool. Generally hydraulic models are calibrated to a specified event and the set of parameters is used in the prediction of other events of higher magnitude. The challenge inherent in the situation is whether the calibrated parameters are suitable for the prediction of other events. In this context the records from two flood events that occurred in December 2013 in Colatina-ES were used, one with 13 and another with 71 years return period. HEC-RAS, considering the permanent flow, was calibrated with the 13 years event, and checked whether the set of parameters to enable reproduction of the flood inundation mapped to the 71 years event. The results showed that the set of calibration parameters can be used to simulate events of higher magnitude. Thus, the HEC-RAS was used to predict the extent of flooding, considering the current conditions of soil use and occupation, if repeated maximum flow occurred in 1979 in Colatina-ES, which is associated with a return time 327 years.

Palavras-Chave – Inundações urbanas, modelo hidráulico

1) Mestrando em Engenharia de Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG. Avenida Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-901. Belo Horizonte – MG – Brasil. Telefone: (31) 3409-4081 e Pesquisador em Geociências: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Email: marloncoutinho@ufmg.br e marlon.coutinho@cprm.gov.br.

2) Professor adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG. Avenida Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-901. Belo Horizonte – MG – Brasil. Telefone: (31) 3409-4081 e Pesquisador em Geociências: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Email: eber@ehr.ufmg.br e eber.andrade@cprm.gov.br.

INTRODUÇÃO

As consequências socioeconômicas das áreas afetadas por enchentes impõe a necessidade do desenvolvimento de metodologias para a avaliação e previsão dos riscos da inundação em áreas urbanas (Masoero *et al.* 2012). A modelagem hidráulica computacional é empregada como uma das ferramentas no estudo de inundações urbanas.

Atualmente a maioria dos modelos de hidráulica computacional permite a simulação de escoamento unidimensional em regime permanente, a propagação unidimensional e/ou bidimensional em regime transitório. No caso do regime permanente os perfis de linha d'água são calculados entre duas seções pela resolução da equação de energia por um processo iterativo conhecido como Método Passo Padrão, introduzido por CHOW (1959). Existem inúmeros exemplos de aplicação do Método Passo Padrão, entre os quais podemos citar Campos (2011) e Vianna (2000).

De uma forma geral os modelos hidráulicos são calibrados com eventos de baixa magnitude devido à raridade do registro adequado da ocorrência de eventos de maior porte. Dessa forma admite-se que o conjunto de parâmetros calibrados é adequado para representar os eventos de maior magnitude, como por exemplo, cheias de 150 anos.

As vazões de inundação inseridas nos modelos hidráulicos são na sua maioria definidas por curvas-chave. Quando a extrapolação da curva-chave vai muito além das vazões medidas, podem ser geradas incertezas na calibração dos modelos hidráulicos. Portanto avaliar o desempenho da calibração do modelo apenas com dados hidrométricos pode não ser suficiente para representar as áreas inundadas. A inclusão da mancha de inundação conhecida por mapeamento possibilita a avaliação do desempenho do modelo que está na capacidade do mesmo representar a extensão da mancha observada (Horritt e Bates, 2002).

Neste contexto foram utilizados os registros de dois eventos de cheia ocorridos em dezembro de 2013 em Colatina-ES, um com 13 anos e outro com 71 anos de tempo de retorno. O HEC-RAS, considerando o escoamento permanente, foi calibrado com o evento de 13 anos e verificado se o conjunto de parâmetros permitiria a reprodução da mancha de cheia mapeada para o evento de 71 anos.

Este artigo apresenta uma forma de avaliação da adequabilidade do uso de parâmetros calibrados para eventos de maior frequência na previsão da extensão da inundação associados a eventos raros. Como, no caso de Colatina, verificou-se que era possível utilizar o conjunto de parâmetros para simular manchas de inundação de eventos menos frequentes, também foi simulada, considerando as atuais condições de uso e ocupação do solo, a vazão máxima ocorrida em 1979, a qual está associada a um tempo de retorno de 327 anos.

HEC-RAS

O software HEC-RAS foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC), uma instituição conjunta ao Institute for Water Resources, do US Army Corps of Engineers, o qual está disponível gratuitamente e possibilita a análise dos escoamentos em rios e canais abertos. O HEC-RAS permite a simulação de escoamento unidimensional em regime permanente e a propagação unidimensional em regime transitório. Também está disponível um suplemento, chamado HEC-GeoRAS, que é uma extensão GIS que fornece uma série de procedimentos e ferramentas para a preparação dos dados georreferenciados para importação para o HEC-RAS e a geração de resultados georreferenciados a partir do HEC-RAS.

A metodologia empregada pelo HEC-RAS para análise de escoamentos em regime permanente é a solução da equação de energia de Bernoulli, apresentada abaixo, utiliza o Método Passo Padrão, “Standard Step Method”.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Onde: Y_1 e Y_2 (m) são as profundidades das seções transversais, Z_1 e Z_2 (m) são as cotas do fundo do canal, α_1 e α_2 são os Coeficientes de Coriolis, V_1 e V_2 (m/s) são as velocidades médias, g (m/s^2) é a aceleração da gravidade e h_e representa a perda de carga no trecho.

As perdas de carga entre as seções são resolvidas conforme a expressão:

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

Onde: L (m) representa o comprimento do trecho, \bar{S}_f (m/m) a declividade média representativa do atrito entre duas seções, α_1 e α_2 Coeficientes de Coriolis, V_1 e V_2 são as velocidades médias nas seções e C) o coeficiente de perda por contração ou expansão.

DESCRIÇÃO DOS EVENTOS DE CHEIA DE DEZEMBRO DE 2013

A cidade de Colatina localiza-se na Região Norte do Estado do Espírito Santo e possui grande potencial econômico e industrial. É considerada a maior cidade do interior do estado, com cerca de 120 mil habitantes. Possui altitude média de 71 metros, clima quente úmido, com inverno seco. A temperatura média é de 24,1°C. Os eventos de enchente ocorrem no período chuvoso entre outubro a março, com maiores registros entre dezembro e fevereiro. A área de drenagem do rio Doce em Colatina é de 76.400km², os principais afluentes que têm sua foz localizada na cidade são os rios Santa Joana e Santa Maria pela margem direita e o rio Pancas pela margem esquerda, juntos

possuem área de drenagem de 3.006 km². O principal responsável pelas enchentes na cidade de Colatina é o próprio rio Doce. A Figura 1, lado esquerdo, ilustra a localização da cidade de Colatina na bacia do rio Doce. No canto superior direito da Figura 1 está apresentado modelo topológico das seções topobatimétricas. Além da estação fluviométrica de Colatina, código 56994500, já existente, em 2010 a CPRM instalou 7 seções de réguas linimétricas para registrar a variação do perfil da linha d'água do rio Doce em um trecho de aproximadamente 8 km em Colatina.

O trecho do rio Doce em Colatina é monitorado pelo Sistema de Alerta da bacia do Rio Doce operado pela CPRM. Através dos registros de monitoramento foi possível verificar a evolução temporal dos eventos de inundação ocorrido em dezembro de 2013, conforme é possível visualizar na Figura 1, lado inferior direito.

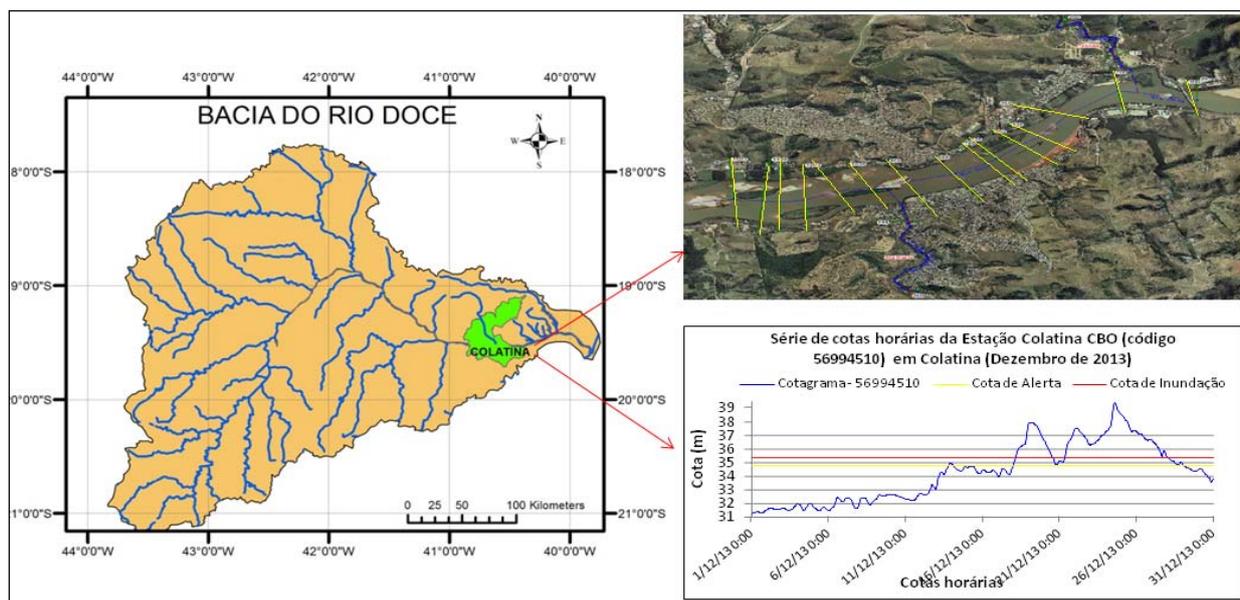


Figura 1 – Localização da cidade de Colatina na bacia do rio Doce a esquerda, modelo topológico das seções topobatimétricas no lado superior direito e evolução temporal do cotograma observado do mês de dezembro de 2013 no lado inferior direito

No hidrograma acima pode ser observado o primeiro evento com pico de cheia no dia 19, o rio subiu 2,6 metros acima da cota de inundação e vazão de pico de 6924 m³/s. No dia 20/12/2013 foi realizado campanha de campo com o objetivo de realizar medições de descarga líquida e mapeamento da mancha de inundação. No segundo evento com pico em 24/12/2013, o rio subiu 4 metros acima da cota de inundação e vazão de pico de 9196 m³/s. Esse foi o segundo maior evento de cheia registrado para a estação Colatina (56994500). Foi realizada em 05/01/2014, nova campanha de campo para o mapeamento da segunda mancha de inundação e com a utilização de aparelhos GPS geodésico (TechGeo GTR G²), foram feitas amarrações dos pontos de cheia, bem como das réguas linimétricas à rede oficial do IBGE. A Figura 2 ilustra a demarcação das manchas de inundação dos eventos de 19/12/2013 e 24/12/2013 e a Tabela 1 apresenta a identificação das cotas altimétricas do zero das réguas das 8 seções e as cotas máximas registradas nos eventos dos dias 19/12/2013 e 24/12/2013 com referência local e altimétrica.



Figura 2 - Demarcação das manchas de inundação dos eventos de 19/12/2013 e 24/12/2013

Tabela 1 - nivelamento das oito réguas linimétricas e identificação das cotas e nível da água dos eventos do dia 19/12/2013 e 24/12/2013

Estação**	Seção	Ponto	Cota altimétrica do zero da régua (m)	Leitura 19/12/13 (mm)	Leitura 24/12/13 (mm)	Cota altimétrica 19/12/13 (m)	Cota Altimétrica 24/12/13 (m)
56995601	100	RNP	29,39	7377	8814	39,98	38,41
56994610	200	RNAux	29,56	7562	8938	37,20	38,58
56994601	300	RNAux	29,93	7612	9044	37,54	38,97
56994510	600	RN3	30,15	7820	9290	37,97	39,44
56994500	800		30,56	-	-	-	-
56994220	1000	RNAux	30,88	7366	9060	38,24	39,94
56994210	1200	RNP	31,21	7184	8628	38,40	39,84
56994200	1500	RNAux	31,38	6900	8688	38,28	40,07*

Observação: NA significa nível da água
*Valor estimado por interpolação linear simples
A seção 800 refere-se à estação Colatina (56994500) e esta temporariamente desativada em função da reforma da ponte. Por este motivo não foi realizado o seu nivelamento
** Código da CPRM

METODOLOGIA

Análise de frequência

Nesse trabalho foram utilizadas séries de máximos anuais e verificado o ajuste as seguintes distribuições de frequência: Gumbel, Generalizada de Eventos Extremos e Log-Normal.

Na análise de frequência de vazões máximas da estação Colatina-56994500 foi utilizada uma série anual com 72 observações. Baseado no teste de aderência Anderson-Darling foi utilizado a distribuição Log-Normal com os parâmetros estimados pelo método dos momentos-L.

Os quantis associados aos eventos de 19/12/2013 (6.124 m³/s), 24/12/2013 (9.196 m³/s) e a cheia de 1979 (11.200 m³/s) são respectivamente 13, 71 e 327 anos.

Calibração e validação do modelo

Para estimativa do perfil da linha d'água, foi aplicado o método numérico iterativo "Standard Step Method". As mudanças no nível da linha d'água de uma seção transversal para outra são calculadas através da equação de energia que está descrita na equação 1. O software com o "Standard Step Method" usado nesse trabalho foi o HEC-RAS do U.S Army Corps of Engineers, versão 4.1 de janeiro de 2010.

Os parâmetros a serem calibrados são: os coeficientes de contração ou expansão; e o de rugosidade, n , do canal principal e das margens de cada uma das seções transversais. Os dados usados na calibração e validação do modelo são as características das seções transversais, as vazões, as marcas de cheias dos eventos de 2013 e as informações do monitoramento de níveis do rio.

Neste trabalho também foi utilizado o suplemento HEC-GeoRAS. O Modelo digital do terreno utilizado foi elaborado aplicando o algoritmo TOPO-TO-RASTER do Arc-GIS aos dados planialtimétricos do terreno obtidos em campanhas de campo com receptores GPS Geodésicos de duas frequências (L1/L2). Também foram utilizadas as informações das seções topobatimétricas niveladas e as curvas de níveis com equidistância de 1m fornecidas pela SANEAR-Colatina.

A calibração do modelo foi efetuada com base no evento de cheia do dia 19/12/2013. Os coeficientes de Manning, n , definidos para as seções de um modo geral variaram entre 0,028 a 0,03 no canal principal e de 0,045 a 0,06 para a planície de inundação. Os coeficientes de contração e expansão adotados nas seções com pouca obstrução foram de 0,1 a 0,3, respectivamente e nas seções transversais com presença de grande quantidade de ilhas, 0,2 e 0,4 respectivamente. Os resultados da calibração do modelo hidráulico com dados do monitoramento do pico de cheia do evento do dia 19/12/2013 estão apresentados na Tabela 2.

Pode ser verificado que os resultados são satisfatórios. A diferença máxima entre o valor observado e o simulado é de 13 cm. A seção 600 é a estação fluviométrica Colatina Corpo de Bombeiros (56994510), pertencente à Rede hidrometeorológica da ANA.

Tabela 2 - Resultados encontrados durante a calibração do modelo hidráulico com o monitoramento da cheia do dia 19/12/2013

	Seção						
	1500	1200	1000	600	300	200	100
NA (m) Observado	38,55	38,39	38,25	37,97	37,54	37,20	36,98
NA (m) Simulado	38,48	38,37	38,27	37,97	37,43	37,31	37,11
Diferença (m)	0,07	0,02	-0,02	0,00	0,11	-0,11	-0,13

Como segunda fonte de avaliação de desempenho da calibração, as zonas inundadas previstas pelo modelo hidráulico HEC-RAS foram comparadas com as manchas observadas aplicando a seguinte medida de desempenho (Horritt e Bates, 2002):

$$F = \frac{\text{Num}(S_{\text{mod}} \cap S_{\text{obs}})}{\text{Num}((S_{\text{mod}} \cup S_{\text{obs}}))} \times 100 \quad (3)$$

Onde: Num (.), representa sub-regiões (pixels, células ou áreas) do MDT atingidas pelas manchas de inundação, onde neste estudo S_{mod} e S_{obs} serão as extensões da área inundada simulada pelo modelo hidráulico e área observada obtida através da delimitação do contorno das manchas de inundação dos eventos de 2013, respectivamente. Portanto F varia entre 0 para o modelo com nenhuma sobreposição entre as áreas inundadas por simulação e observadas e 100 para um modelo em que as manchas coincidem perfeitamente.

Ressalva-se que neste trabalho para o cálculo da medida de desempenho desconsiderou-se a calha do rio Doce, a qual é comum à mancha simulada e observada. A calha do rio Doce foi definida pela vazão de 3679 m³/s.

Assim, também foi realizada uma avaliação do conjunto de parâmetros do evento do dia 19/12/2013, comparando as zonas inundadas previstas pelo modelo hidráulico HEC-RAS com as manchas observadas aplicando a medida de desempenho descrita pela equação 3. A Tabela 4 apresenta os resultados da avaliação do desempenho do modelo hidráulico em simular a mancha de inundação observada do evento 19 de dezembro de 2013. A Figura 3 apresenta a mancha observada e simulada para o evento de 19/12/2013.

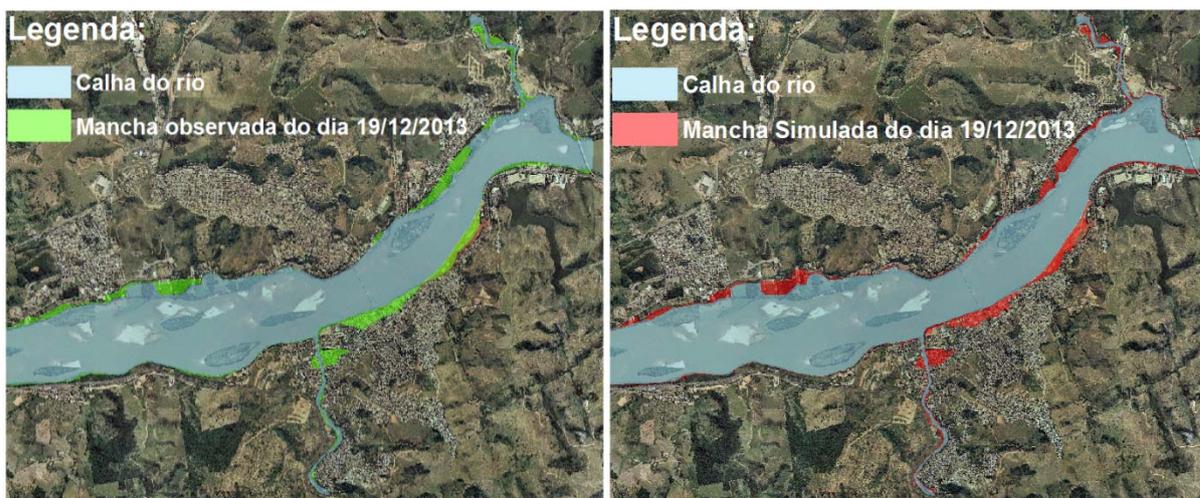


Figura 3 - A mancha observada e simulada do dia 19/12/2013

Validação do modelo

A validação do conjunto de parâmetros calibrados foi realizada utilizando o perfil da linha d'água observado e a mancha de inundação mapeada do evento de 24/12/2013, a qual está associada a um tempo de retorno de 71 anos.

O conjunto de parâmetros calibrados para o evento do dia 19/12/2013 foi utilizado para simular o evento do dia 24/12/2013 (Tabela 3). Pode ser verificado que os resultados são satisfatórios. A diferença máxima entre o valor observado e o simulado é de 14 cm. A Figura 4 apresenta a mancha observada e simulada para o evento de 24/12/2013.

Tabela 3 - Resultados da simulação do evento do dia 24/12/13 calibrados com os parâmetros calibrados para o evento de 19/12/2013

	Seção						
	1500	1200	1000	600	300	200	100
NA (m) Observado	40,02	39,79	39,72	39,44	38,97	38,58	38,41
NA (m) Simulado	39,89	39,79	39,69	39,39	38,82	38,72	38,49
Diferença (m)	0,13	0,00	0,03	0,05	0,15	-0,14	-0,08



Figura 4 - A mancha observada e simulada do dia 24/12/2013

Também foi realizada uma comparação das zonas inundadas previstas pelo modelo hidráulico HEC-RAS, utilizando os parâmetros calibrados para o evento de 19/12/2013, com as manchas observadas no dia 24/12/2013 aplicando a medida de desempenho descrita pela equação 3. A Tabela 4 apresenta os resultados da avaliação do desempenho do modelo hidráulico simular a mancha de inundação observada do evento 24 de dezembro de 2013.

Tabela 4- Resultados da avaliação do desempenho do modelo hidráulico simular a mancha de inundação observada dos dois eventos de dezembro de 2013

		Fator F
Parâmetros calibrados para o evento de 19/12/2013	Mancha de Inundação Observada de 19/12/2013	71,68 %
Parâmetros calibrados para o evento de 19/12/2013	Mancha de Inundação Observada de 24/12/2013	78,78%

Os resultados mostraram que o conjunto de parâmetros calibrados pode ser utilizado para previsão de eventos de maior magnitude, pois os parâmetros calibrados com as informações do dia 19/12/2013 conseguiram simular adequadamente o evento de 24/12/2013.

Simulação da vazão do evento de fevereiro de 1979

A enchente de fevereiro de 1979 foi um dos maiores desastres naturais registrados no estado de Minas Gerais e do Espírito Santo. Mesmo após 35 anos de sua ocorrência a lembrança dos danos causados permanece viva na memória das pessoas, principalmente para os moradores ribeirinhos. A vazão de pico em Colatina foi de 11.200 m³/s, sendo este valor estimado em função da descarga de

10.700 m³/s da UHE Mascarenhas, localizada a aproximadamente 32 km a montante de Colatina no rio Doce. Ressalta-se que essas estimativas de vazão foram feitas em 1981, pelo Grupo Interministerial de Trabalho para realizar estudos para a prevenção e o controle das enchentes do rio Doce (Relatório, Quadro 2, página 118).

Na análise estatística da série de vazões máximas anuais da estação Colatina (56994500), esta vazão está associada a um tempo de retorno de 327 anos. O dado de vazão de 1979 e o conjunto de parâmetros calibrados foram utilizados para prever a extensão da inundação, considerando as atuais condições de uso e ocupação do solo, caso se repita a vazão máxima ocorrida em 1979, em Colatina-ES. A Figura 5 ilustra a simulação da mancha de inundação associada a vazão de pico do evento de fevereiro de 1979.



Figura 5 - Simulação da mancha de cheia da vazão de pico de fevereiro de 1979

Também foi realizada comparação das áreas inundadas e das profundidades dos três eventos simulados. Salienta-se que nessa análise não foi considerada a calha do rio, mas, somente as áreas correspondentes ao extravasamento da calha. A Figura 6 apresenta de forma gráfica os resultados.

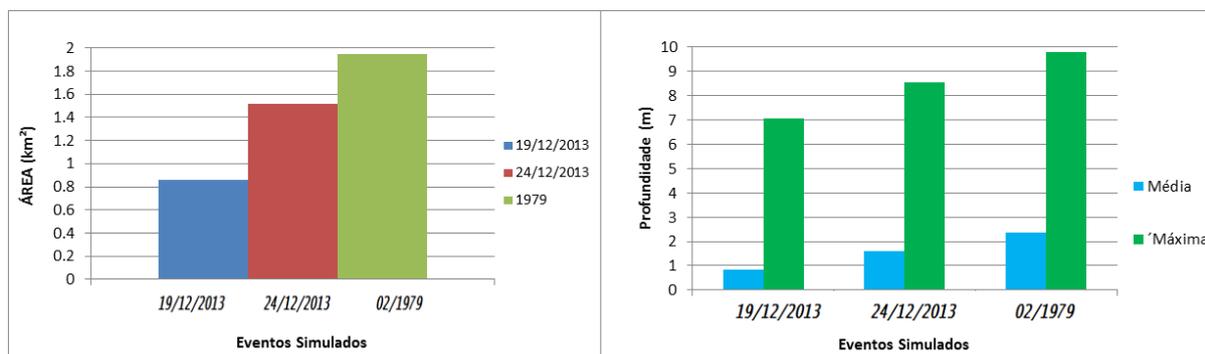


Figura 6 – Áreas inundadas e profundidades dos eventos simulados

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma forma de avaliação da adequabilidade do uso de parâmetros calibrados para eventos de maior frequência na previsão da extensão de inundações associadas a eventos raros.

A avaliação foi realizada comparando-se os perfis da linha d'água e a extensão das manchas de inundações observadas e simuladas. No caso dos perfis da linha d'água foi verificado se os perfis simulado e observado foram coincidentes. E a avaliação da simulação da mancha de inundação observada foi realizada com uma modificação da medida de desempenho proposta por Horritt e Bates (2002).

Neste contexto foram utilizados os registros de dois eventos de cheia ocorridos em dezembro de 2013 em Colatina-ES, um com 13 anos e outro com 71 anos de tempo de retorno. O modelo hidráulico utilizado foi o HEC-RAS, considerando o escoamento permanente.

Os resultados indicaram que, no caso de Colatina, os parâmetros calibrados com o evento de 13 anos são adequados para simular evento de maior magnitude. Sendo assim, também foi simulada, considerando as atuais condições de uso e ocupação do solo, a vazão máxima ocorrida em 1979, a qual está associada a um tempo de retorno de 327 anos.

Os resultados deste trabalho também indicam que a comparação dos perfis da linha d'água e a avaliação da extensão das manchas de inundações observadas e simuladas são instrumentos adequados de verificação da adequabilidade de se utilizar parâmetros calibrados para eventos ordinários na previsão da extensão da inundação associados a eventos menos frequentes.

BIBLIOGRAFIA

CAMPOS, R.G.D. (2011) “*Análise da representatividade de diferentes hipóteses se modelagem matemática para definição de manchas de inundação em áreas urbanas – estudo de caso da cidade de Governador Valadares – MG*”. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Recursos hídricos - UFMG 181p.

CHOW, V. T. *Open Channel Hydraulics* (1959). McGraw-Hill, São Paulo, 680p.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (2014). *Relatório Técnico do período Crítico de Dezembro de 2013: Sistema de Alerta de Enchentes da Bacia do Doce*, CPRM. Belo Horizonte, 2014.

GRUPO INTERMINISTERIAL DE TRABALHO PARA REALIZAR ESTUDOS PARA A PREVENÇÃO E O CONTROLE DAS ENCHENTES DO RIO DOCE. (1982), *Relatório*, 226p.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. (2002). “*Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation*”. *Journal of Hydrology*, 268, pp. 87-99

MASOERO, A.; CLAPS, P.; ASSELMAN, N.E.M.; MOSSELMAN, E.; BALDASSARE, G. (2012). “*Reconstruction and analysis of the Po River inundation of 1951*”. *Hydrological Processes* 27, pp. 1341–1348.

SILVA, R. C. V.; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. (2003). *Hidráulica Fluvial*. COPPE/UFRJ, 520p

VIANNA A.P.P. (2000) “*Utilização de Modelagens Hidrológica e Hidráulica Associadas a um Sistema de Informações Geográficas para Mapeamento de Áreas Inundáveis - Estudo de Caso: Município de Itajubá, MG*”. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Recursos hídricos - UFMG 154p.