



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO PARA UMA MICROBACIA HIDROGRÁFICA LOCALIZADA NA ENCOSTA SUPERIOR DA SERRA GAÚCHA

Fernando Bonotto Missiaggia¹; Marcio Vicente Duarte Adami²; Rossano Belladonna^{3} & Tiago de Vargas⁴*

Este artigo apresenta a calibração e validação de um modelo hidrológico para a bacia do Sepultura, localizada no município de Caxias do Sul, RS. A bacia hidrográfica em estudo possui área de 43,66 km² e rede de monitoramento pluviométrico e fluviométrico com dados coletados a cada 5 minutos. A modelagem hidrológica foi desenvolvida no software HEC-HMS com a aquisição de dados em campo e em escritório através do uso do programa de geoprocessamento ArcGIS. A partir das características físicas da área em estudo, foram escolhidos modelos matemáticos para cálculo dos hidrogramas com o intuito de comparar ao hidrograma observado na estação fluviométrica. A calibração foi realizada de forma automática com o uso da função objetivo *sum-absolute residuals*. Já para a qualificação, utilizou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe, que na etapa da calibração obteve-se um valor de 0,713 e para as validações 0,505 e 0,799, respectivamente, sendo assim enquadrado como valores aceitáveis e adequados pela literatura. Deste modo, a calibração da bacia do Sepultura se mostrou satisfatória, tal que os parâmetros calibrados poderão ser utilizados para estimar eventos de enchentes e criação de cenários de possíveis urbanizações na bacia hidrográfica para quantificação dos impactos gerados.

Palavras-Chave – Calibração, validação, modelagem.

CALIBRATION AND VALIDATION OF A HYDROLOGICAL MODEL FOR A SMALL WATERSHED LOCATED IN THE SERRA GAÚCHA

This article presents the calibration and validation of a hydrological model for the Sepultura watershed, located in Caxias do Sul, RS. The watershed under study has an area of 43.66 km² and a rainfall and fluviometric monitoring network with data collected every 5 minutes. Hydrological modeling was developed in the HEC-HMS software with field and office data acquisition with the use of ArcGIS software. From the physical characteristics of the study area, mathematical models were chosen to calculate the hydrographs in order to compare to the observed hydrograph. Calibration was performed automatically by using the sum-absolute residuals objective function. The Nash-Sutcliffe coefficient was used for the qualification of the comparison, which in the calibration step obtained a value of 0.713 and for the validations resulted in 0.505 and 0.799, respectively, thus being framed as acceptable and adequate values according to the literature. In conclusion, the calibration of the Sepultura watershed was considered satisfactory, such that the calibrated parameters could be used to estimate flood events and create scenarios of possible urbanization to quantify impacts.

Keywords - Calibration, validation, modeling.

¹ Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade de Caxias do Sul, fbmissiaggia1@ucs.br

² Engenheiro Agrônomo – Técnico em Hidrologia no Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto – SAMAE, mvadami@samaecaxias.com.br

^{3*} Engenheiro Ambiental no Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto – SAMAE, rbelladonna@samaecaxias.com.br

⁴ Geólogo no Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, tvargas@samaecaxias.com.br



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

1. INTRODUÇÃO

Segundo Paiva e Paiva (2001), às alterações físicas da superfície da bacia hidrográfica têm impactos significativos sobre o escoamento. Essas alterações podem ser classificadas de acordo com tipo de mudança e uso da superfície do solo, os quais podem ser por desmatamento, reflorestamento, urbanização, uso de culturas agrícolas permanentes ou anuais.

A previsão dos efeitos da urbanização em uma bacia hidrográfica e quantificação da alteração do escoamento superficial podem ser realizadas com o uso da modelagem hidrológica através do *software* HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) (USACE, 2000). Os usos dos diferentes tipos de programas computacionais para modelagem servem como ferramenta de gestão para organização dos espaços territoriais, prevendo eventos futuros, como por exemplo, o impacto da urbanização e previsões de enchentes, impactos em rios e ocorrências de eventos meteorológicos extremos (TUCCI, 1998).

No sentido de contribuir para o desenvolvimento de pesquisas nesta linha, o presente artigo se baseia no estudo envolvendo a bacia de captação do Sepultura, localizada no município de Caxias do Sul – RS. O objetivo principal deste estudo é a calibração de um modelo matemático hidrológico e posterior validação dos resultados advindos da calibração quando utilizado no HEC-HMS, com o intuito de buscar a melhor representação do escoamento superficial quando comparados aos hidrogramas monitorados pela estação fluviométrica, localizada nas coordenadas 28°59'5,6305"S e 50°50'17,8725"W. O modelo de representação da bacia irá servir como ferramenta posterior para estudos que envolvam a criação de cenários de urbanização, quantificando assim, possíveis alterações da vazão do escoamento superficial ocasionado pela interferência antrópica na área em estudo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A bacia de drenagem do Sepultura está localizada no município de Caxias do Sul, na região da serra Gaúcha (Figura 1). A mesma possui uma área de contribuição de 43,66 km², diferença de altitude de 180 m, comprimento e declividade do talvegue principal de 11,6 km e 15,51 m/km, respectivamente. O uso do solo é predominantemente mata, coberto em 85,3%, e o restante 13,85% por florestas, 0,8% por agricultura e somente 0,05% por residências.

A declividade da bacia foi classificada em 6 classes distintas de acordo com a metodologia de Flores et al. (2012). A quantificação destas áreas foi realizada via *software* ArcGIS, onde revelou que 9,05 km² da área é constituída por relevo plano, 15,22 km² para relevo suave ondulado, 7,22 km² para relevo moderadamente ondulado, 7,05 km² para relevo ondulado, 4,96 km² para relevo forte ondulado, 0,11 km² para relevo montanhoso e 0,024 km² para relevo escarpado.

Os tipos de solos encontrados na bacia do Sepultura foram baseados no levantamento pedológico realizado pela Embrapa (2007), que caracterizaram a pedologia de toda a região Corede Serra, abrangendo assim o município de Caxias do Sul. Através do trabalho da Embrapa, verificou-se que a bacia possui os seguintes solos no espaço territorial: Cambissolo Húmico Tb Alumínico típico, Neossolo Litólico Húmico típico, Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, Neossolo Litólico Distrófico típico e Nitossolo Bruno Distrófico A proeminente. Destaca-se também pelo levantamento realizado a presença de rocha exposta na área da bacia, fato que foi confirmado com idas a campo.

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

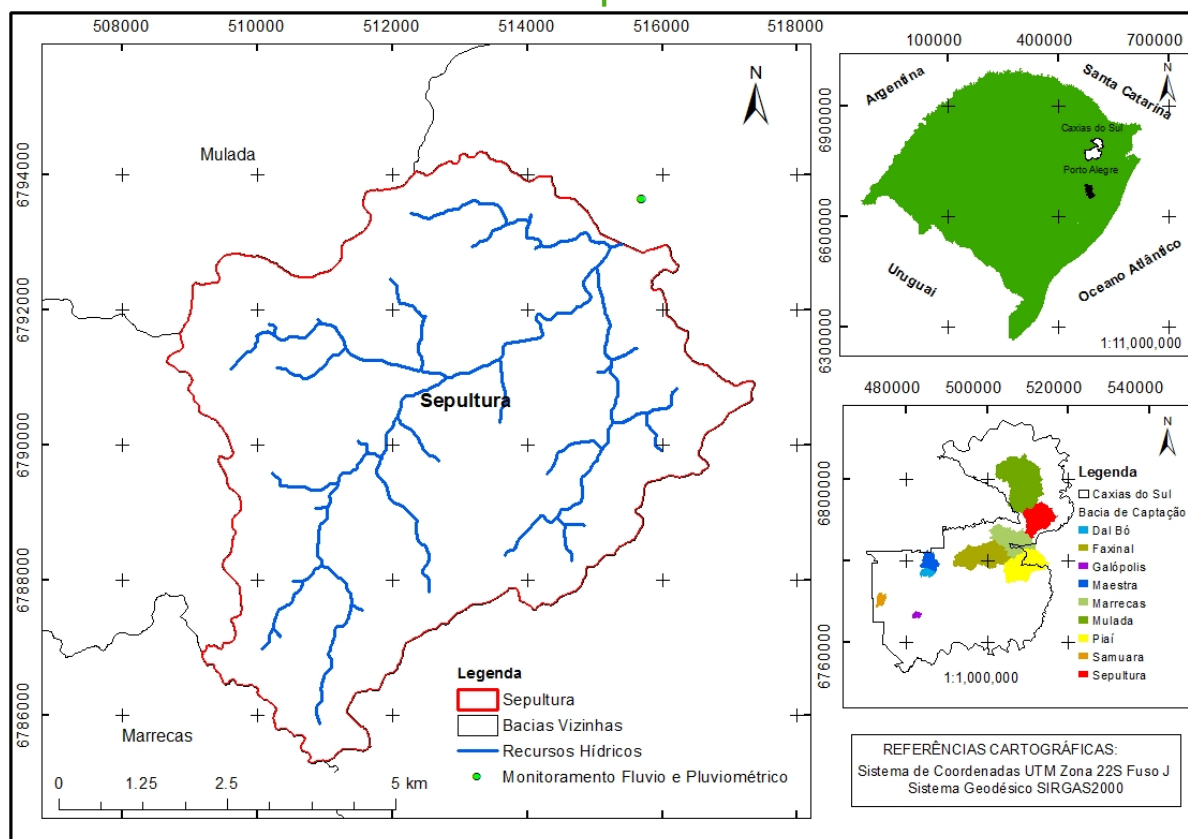


Figura 1 – Mapa de localização da bacia do Sepultura em estudo.

A bacia do Sepultura possui monitoramento de chuva e vazão do período que corresponde a janeiro 2012 a maio de 2017. São coletados o volume precipitado e nível da lâmina da água através de pluviômetro e linígrafo automático. Ambos os equipamentos possuem *data logger* para armazenamento de dados e coleta a cada 5 minutos. A curva chave utilizada na seção transversal da bacia para transformação dos dados de nível em vazão foi adquirida a partir do trabalho de Adami *et al.* (2013).

2.1. Modelos matemáticos utilizados

O modelo de perda por infiltração de água no solo utilizado no HEC-HMS foi o SCS (*Soil Conservation Service*). Os cálculos envolvendo este método são baseados em equações empíricas em relação a capacidade de armazenamento de água no solo e é utilizado em ampla escala mundial devido ao número reduzido de parâmetros de entrada (TUCCI, 1998). Para o cálculo envolvendo o SCS é necessário a determinação da constante de perda (CN), variável de entrada do HMS e essencial para a confecção do hidrograma unitário. A determinação do CN foi baseada na umidade antecedente do solo, no uso e ocupação do solo na bacia, tipo pedológico e o grupo hidrológico do solo para posterior realização da média ponderada. Em relação ao grupo hidrológico, a classificação foi adaptada para a realidade brasileira, metodologia proposta por Sartori (2004).

Um dos modelos disponíveis para transformação de chuva em vazão no HEC-HMS é hidrograma unitário de Clark, o qual é inteiramente sintético e é formado primeiramente pela divisão



XXII SÍMPOSIOS BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

da bacia em subáreas e posterior translação destas para contribuição do hidrograma, em um segundo momento corresponde a simulação de um reservatório linear para considerar a diminuição da vazão quando cessada a chuva (PORTO, FILHO e MARCELLINI, 1999). No HMS as variáveis de entrada para este método são a introdução do tempo de concentração da bacia (t_c) e coeficiente de armazenamento (R). Para o t_c a equação que melhor se enquadrou foi a de Simas-Hawkings desenvolvida para bacias rurais de até 15 km². Já o coeficiente de armazenamento foi considerado como sendo 60% do tempo de concentração (TOMAZ, 2016).

O escoamento de base utilizado para a modelagem do Sepultura foi o de recessão, que simula o comportamento típico observado nas bacias quando a vazão do canal reduz exponencialmente após um evento de precipitação (USACE, 2013). Este modelo de escoamento base segundo Knebl (2005), é de importância para estudos de inundações e alagamentos. No HEC-HMS, os dados de entrada para os cálculos são a vazão observada de ascensão e recessão do hidrograma e também a constante de recessão de decaimento quando finalizada a precipitação.

2.2. Função objetivo para otimização de dados da calibração e análise de eficiência

O HEC-HMS disponibiliza 8 funções objetivos para calibração automática de dados de entrada. Estas têm a função de ajustar as variáveis de entrada no *software* para igualar ou aproximar o hidrograma calculado do hidrograma observado (USACE, 2000). Para este estudo, foi considerada a otimização de todos os parâmetros dos modelos matemáticos de entrada (modelo de perda, modelo chuva-vazão e modelo escoamento de base). A Equação 1 utilizada para calibração dos dados foi a *sum-absolute residuals*, que relaciona a soma das diferenças absolutas entre o fluxo observado e calculado.

$$Z = \sum_{t=1}^n |Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)| \quad (1)$$

Onde:

Z = Função objetivo;

$Q_{obs}(t)$ = Vazão observada no tempo (t) [m³/s];

$Q_{sim}(t)$ = Vazão calculada no tempo (t) [m³/s].

Para qualificar o hidrograma calculado do hidrograma observado, o HMS disponibiliza o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) que indica estatisticamente a avaliação da qualidade do modelo. Este coeficiente é altamente recomendado pela *American Society of Civil Engineers* e comumente utilizado em vários trabalhos na literatura (MORIASI *et al.* 2007). A Equação 2 expressa a fórmula de Nash.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{nt} [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2}{\sum_{t=1}^{nt} [Q_{obs}(t) - Q_{sim}^{méd}(t)]^2} \quad (2)$$

Onde:

$Q_{obs}(t)$ = Vazão observada no tempo (t) [m³/s];

$Q_{sim}(t)$ = Vazão simulada no tempo (t) [m³/s];

$Q_{sim}^{méd}(t)$ = Vazão média observadas em todo o período de simulação [m³/s].

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

Após a determinação dos modelos matemáticos e função objetivo para calibração, discretizou-se a bacia do Sepultura em 5 sub-bacias com uso da ferramenta de extensão ArcHydro, disponível para o ArcGIS. Essa discretização faz com que as variáveis de entrada para os modelos matemáticos não sejam generalizadas para toda a bacia, melhorando a confiabilidade dos resultados. A Tabela 1 mostra as variáveis de entrada para cada uma delas. Já a Figura 2 apresenta as sub-bacias delimitadas na área de trabalho do HEC-HMS.

Tabela 1 – Dados de entrada para a modelagem hidrológica.

Sub-bacia	Área (km ²)	tc (h)	R (h)	CN ponderado	Abstração inicial	Áreas impermeáveis (%)	Coefficiente de recessão
1	15,57	3,67	2,20	72,39	19,36	0,80	0,971
2	8,55	3,32	1,99	67,27	24,71	0,80	0,4
3	10,35	2,94	1,76	72,14	19,61	2,19	0,558
4	4,73	2,18	1,31	71,46	20,28	3,12	0,646
5	4,45	2,06	1,23	72,50	19,26	3,49	0,635



Figura 2 – Área de trabalho do HEC-HMS com a delimitação das 5 sub-bacias, junções e exutório.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a calibração do modelo utilizou-se o período de dados monitorados do dia 01/08/2013 até o dia 31/08/2013. Este evento compreende em um acumulado do mês de agosto de 312 mm de precipitação, ou seja, a maior volume de chuva registrada no ano de 2013 em Caxias do Sul. A Figura 3 apresenta a etapa de calibração do modelo para a bacia do Sepultura, mostrando assim o hidrograma observado e o calculado a partir dos dados de entrada para cada sub-bacia no HEC-HMS.

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

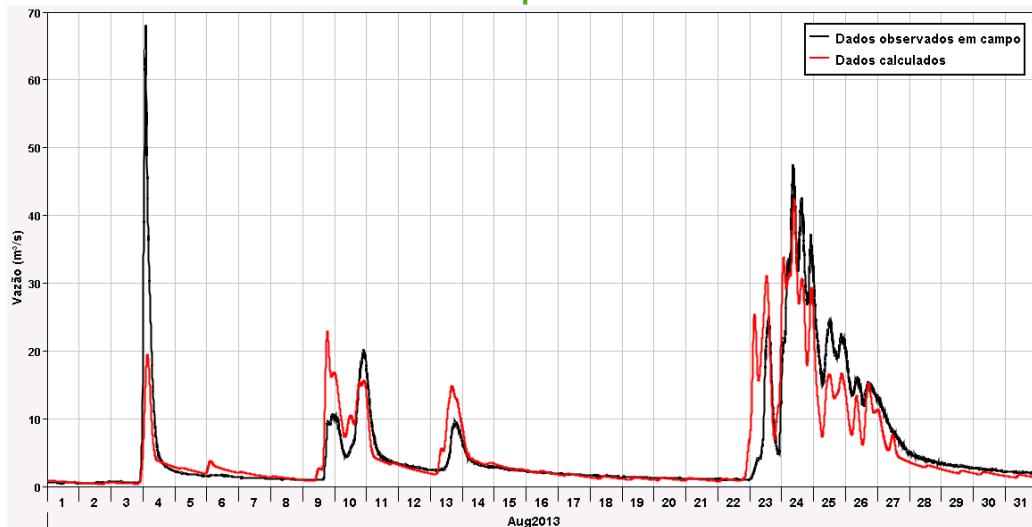


Figura 3 – Calibração automática das variáveis de entrada.

O resultado obtido na etapa da calibração apresentou coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,713. Este coeficiente tem um valor que pode variar de $-\infty$ a 1, sendo que o maior valor corresponde a um ajuste perfeito entre vazões calculadas e observadas. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de Nash superar 0,75, e é considerado aceitável se o valor ficar entre 0,36 e 0,75 (COLLICHONN, 2001).

Depois de realizada a calibração dos parâmetros inseridos no HEC-HMS, os mesmos foram utilizados para validar dois eventos distintos. A primeira validação (Figura 4) compreendeu os dias 01/09/2015 até 30/09/2015 com um acumulado de precipitação de 308,6 mm, o maior do ano de 2015. Para o segundo evento validado (Figura 5) foi selecionado o período que compreendeu os dias 01/08/2016 até 28/08/2016, com um total de precipitação acumulado de 130,8 mm, caracterizado por ser um evento de média intensidade pluviométrica do ano de 2016.

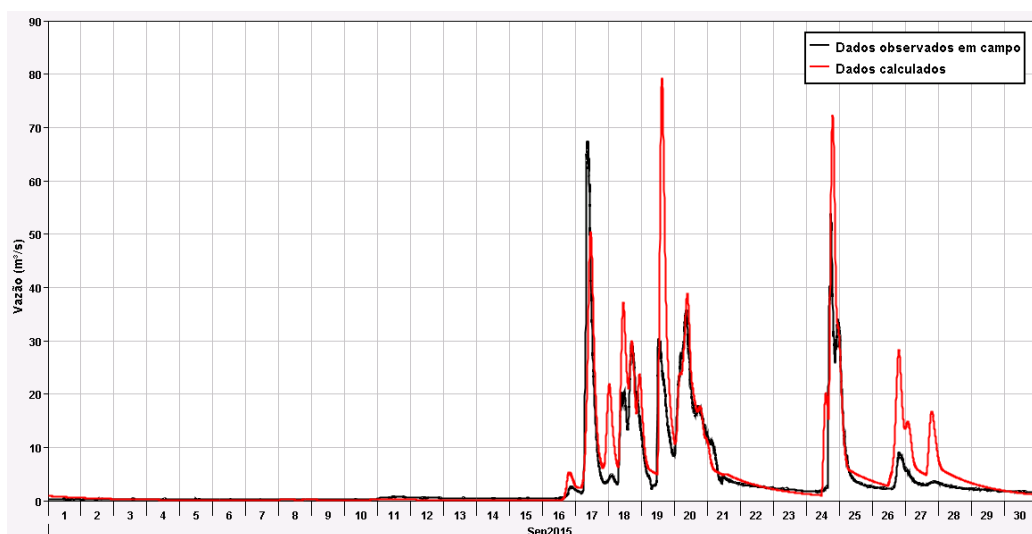


Figura 4 – Validação 1 para o período de 01/09/2015 até 30/09/2015.

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

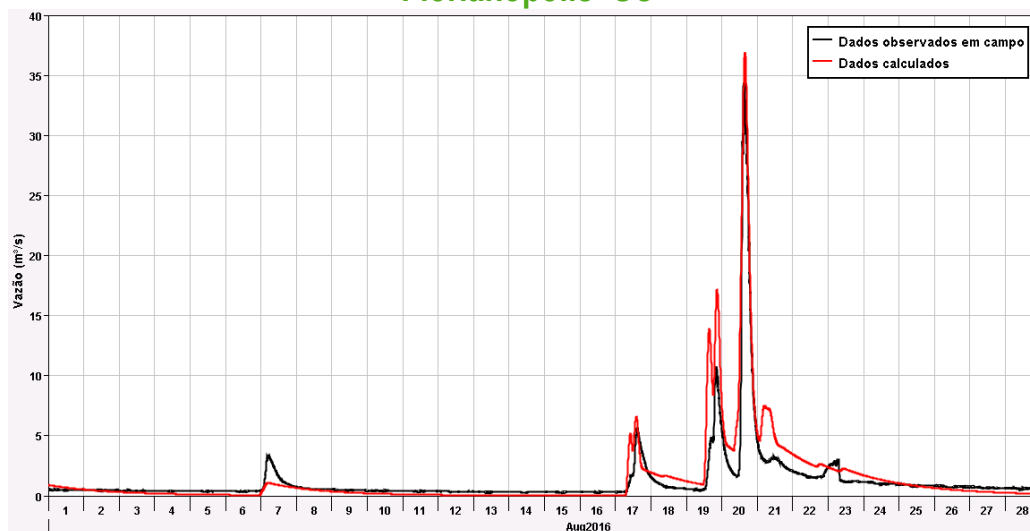


Figura 5 – Validação 2 para o período de 01/08/2016 até 28/08/2016.

Percebe-se que em alguns momentos o hidrograma calculado tende a superestimar ou subestimar os picos de vazão monitorados. Isto pode ser verificado nos dias 4, 9 e 23 na etapa de calibração, porém apresentou boa consistência de volumes no restante do período. Além da calibração, na validação 1, a qual obteve um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,505 apresentou superestimação nos dias 19, 24 e 26 e coerência no restante dos dias. Já para a validação 2, a qual obteve o melhor coeficiente (0,799), apresentou bom volume entre os dados calculados e observados, acompanhando de forma uniforme o pico no dia 21 que teve uma vazão máxima de aproximadamente 35 m³/s.

A partir dos resultados de calibração e validação, nota-se que o hidrograma unitário de Clark utilizado para representação do escoamento superficial mostrou consistência na comparação dos hidrogramas observados e calculados. Além do modelo chuva-vazão, o modelo de perda SCS se mostrou um modelo de fácil aplicação quando não se dispõe sobre muitas informações a respeito das características físicas e químicas do solo. Em relação ao escoamento de base, percebe-se boa curva de decaimento da vazão dos hidrogramas calculados, mostrando um bom ajuste com o observado, acompanhando de forma uniforme na maior parte das simulações a vazão de recessão.

Conclui-se a partir dos resultados que os métodos matemáticos utilizados para representação do escoamento na bacia do Sepultura são eficazes. A calibração das variáveis de representação do hidrograma calculado irá servir de subsídio para trabalhos futuros de previsões de inundações, alagamentos, elaboração de mapa de riscos e cenários de pré-urbanização e urbanização. Compreende que o entendimento das características da bacia e também da alteração do escoamento a partir de intervenções na área, auxilia a elaboração de diretrizes sobre a gestão ocupacional do solo. Podendo assim, informar os impactos gerados na área em caso de migração populacional, sendo uma ferramenta de planejamento ambiental.

Como sugestão para trabalhos futuros, os modelos podem ser aperfeiçoados com o melhoramento da curva-chave, devido a mesma possuir medições de vazão com nível de lâmina da água até 37 cm. Além disto, pode ser feito um melhor detalhamento dos solos de toda a bacia, com



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

testes de infiltração e caracterização física e química de todos os pontos amostrados. Também, pode-se realizar a modelagem com diferentes métodos matemáticos para cálculos de hidrogramas e verificação da melhor metodologia que se adapte as condições da área.

4. REFERÊNCIAS

ADAMI, Marcio Vicente Duarte *et al.* Curva chave – Estudo de caso da bacia hidrográfica do Sepultura, Caxias do Sul – RS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, nov. 2013.

COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica em grandes bacias. 2001. 194f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2007). Levantamento semidetalhado de solos: Região da Serra Gaúcha – Estado Rio Grande do Sul, Escala 1:50.000. Porto Alegre: Editora UFRGS.

FLORES, Carlos Alberto *et al.* Os solos do Vale dos Vinhedos. Embrapa, Brasília, DF, 2012.

KNEL, M.R.; YANG, Z.L.; HUTCHISON, K.; MAIDMENT, D.R. Regional scale flood modeling using rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio river basin summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*. nov. 2004. vol. 75, pp.325-336.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*. v.50. n.3. p.885-900, 2007.

PAIVA, João Batista Dias de; PAIVA, Eloiza Maria Cauduro Dias (Org.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. 625 p.

PORTO, Rubem La Laina; FILHO, Kanel Zahed e MARCELLINI, Silvana Susko. Escoamento Superficial. Disponível em: <www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=7813>. Acesso em maio de 2017.

SARTORI, Anderson. Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Campinas, 2004. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas.

TOMAZ, Plínio. Método Clark. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo_calculos_vazao/capitulo113.pdf>. Acesso em maio de 2017.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Modelos hidrológicos. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre: 1Ed. UFRGS, 1998.

USACE. Technical Reference Manual. HMS-Hydrologic Modeling System, Hydrologic Engineering Center. 2000, p.158.

USACE. User's Manual. HMS-Hydrologic Modeling System, Hydrologic Engineering Center. 2013, p.442.