

# Análise comparativa de métodos de transformação chuva-vazão para pequenas bacias urbanas

## *Comparative analyses of rainfall-runoff transformation methods for small urban basins*

Luiz CARVALHO<sup>1</sup>, José Rodolfo SCARATI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestre em engenharia de recursos hídricos pela Escola Politécnica da USP. E-mail: luiz.carvalho.11@usp.br

<sup>2</sup> Professor Associado da EPUSP. Av. Prof. Almeida Prado, tr 3 n°380, 05508-970 São Paulo, SP. E-mail: scarati@usp.br

**RESUMO:** Diante da difusão do conceito de controle de cheias pela detenção distribuída em pequenas áreas, a escolha do método de transformação chuva-vazão e a estimativa das características geomorfológicas da bacia são determinantes para a qualidade do dimensionamento de pequenas estruturas de detenção aplicadas à drenagem urbana. Este trabalho, então, propõe uma análise comparativa do desempenho de três métodos de transformação chuva-vazão (Método do Hidrograma Unitário Racional, Método do NRCS e o Método de Clark) aplicados a uma pequena bacia localizada dentro dos limites do campus da Universidade de São Paulo, contrapondo-se a vazão de pico, o volume e a forma dos hidrogramas calculados aos dos hidrogramas de eventos reais. Para tanto, foram realizadas medições do nível d'água na seção de controle do canal de drenagem interno ao campus por meio de um sensor ultrassom de precisão de 0,25 centímetros e 1 minuto, desenvolvido no próprio laboratório da universidade, durante a época chuvosa do mês de março de 2019. As funções objetivo foram otimizadas ajustando-se os parâmetros relativos às perdas por infiltração e efeitos de retenção superficial concentradas no parâmetro C, no caso do método racional, e CN, no caso do método do NRCS, usado também para Clark.

Palavras-Chave – Drenagem urbana; hidrograma unitário; pequenas bacias.

**ABSTRACT:** In light of the diffusion of the concept of flood control by means of scattered retention in urban areas, the choice of the rainfall-runoff method and the estimation of the geomorphologic characteristics of the basin determine the accuracy of the sizing process of small retention structures applied to the context of urban drainage. This paper purposes a comparative analysis of the performance of three rainfall-runoff transformation methods (Modified Rational Unit Hydrograph, NRCS Unit Hydrograph and Clark Unit Hydrograph) applied to a small basin located within the borders of the University of São Paulo, comparing the peak discharge, the volume and the shape of the calculated hydrograph to the observed hydrograph. Water level measurements were then carried out on the control section of the universities' drainage canal using an ultrasonic sensor which was entirely developed inside the campus hydraulic laboratory, during the rainy month of March 2019. The optimization functions were refined adjusting the parameters relative to the losses by infiltration and initial retention concentrated in the parameter C, for the Rational Method, and CN for the NRCS method, used for Clark as well.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma gama de soluções técnicas que realizam a detenção de um determinado volume de água de chuva em pequenos e médios lotes para reduzir o pico de runoff neles gerado foi e ainda está sendo desenvolvida e aprimorada recentemente, principalmente em países onde o conceito de drenagem sustentável está mais difundido, tanto no meio acadêmico quanto no meio técnico. São as chamadas LID's – Low Impact Development, WSUDS – Water Sensitive Urban Design ou SUDS – Sustainable Urban Drainage Systems, que incluem dentre outras técnicas, os reservatórios de detenção de pequeno porte para controle do escoamento na fonte (Mascarenhas *et al.*, 2005). Todavia, essas soluções apresentam ainda alguma incerteza em razão de alguns fatores, dentre eles, a carência de referências técnicas nacionais que balizem o seu dimensionamento adequado, notadamente quanto à localização e volume, assim como a carência de recursos para sua implantação.

A utilização, em pequenas bacias, de modelos hidrológicos originalmente desenvolvidos para contextos mais amplos ou genéricos pode frequentemente resultar picos de vazão e/ou volumes de armazenamento superestimados, levando a custos de implantação maiores que os necessários, o que torna a solução economicamente pouco interessante. (Mascarenhas *et al.*, 2005). Nesse contexto, o aprimoramento dos modelos hidrológicos que sejam mais adequados para o caso de pequenas bacias visa contribuir para o desenvolvimento de soluções menos sujeitas a distorções, as quais frequentemente aumentam o custo de implantação e dificultam a difusão do conceito.

A trajetória deste ramo da hidrologia registrou o nascimento de uma variedade desses modelos, dentre os quais destacam-se o Método do NRCS – Natural Resources Conservation Service (NRCS, 1957) e o Método de Clark (Clark, 1945). Ainda, existem aqueles derivados da teoria do Método Racional, dentre os quais destaca-se o Método do Hidrograma Unitário Racional (Singh e Cruise, 1992), concebido especificamente para pequenas bacias. Esses modelos são utilizados pela maioria dos softwares de modelagem hidrológica adotados na prática da engenharia de projetos em diferentes contextos, inclusive para o dimensionamento de pequenas estruturas de detenção. Vale destacar, porém, que a maioria desses modelos foram concebidos por meio de análises de grupos específicos de bacias, transmitindo as peculiaridades desses grupos para as características dos hidrogramas gerados pelos respectivos métodos. Dessa forma, a aplicação

generalizada desses métodos, frequentemente implica distorções, que ao longo do tempo motivaram o desenvolvimento de algumas adaptações a esses modelos de forma a incluir aspectos específicos regionais nas características dos hidrogramas gerados.

Esses três modelos aparecem frequentemente na literatura devido sua ampla utilização no meio técnico (Innocente e Chaffe, 2017) sendo que foram e continuam sendo avaliados comparativamente com relação ao seu desempenho em diferentes estudos de caso. Exemplos recentes indicam conclusões variadas pois frequentemente dependem do contexto em que estão sendo feitas as avaliações. Alguns estudos recentemente publicados apontam melhores resultados do Método de Clark em determinados casos quando comparado a outros métodos, como o Método Racional (Seibt *et al.*, 2012) e o Método do NRCS (Wilkerson e Merwade, 2010). Da mesma forma, existem estudos que apontam um melhor desempenho do método Racional em relação ao Método do NRCS em pequenas bacias (Tassi, 2015), e outros apontam um melhor desempenho do Método do NRCS em relação aos demais. Ainda assim, são poucos os trabalhos que tenham avaliado comparativamente o desempenho desses três modelos especificamente para pequenas bacias urbanas, menores que 2 km<sup>2</sup>, ordem de grandeza comum para áreas drenadas por pequenas estruturas de detenção.

Este trabalho aborda a análise comparativa desses três métodos de transformação chuva-vazão aplicados a um mesmo contexto, uma bacia muito pequena drenada por um pequeno canal de drenagem aberto. Será analisada a aderência dos hidrogramas calculados aos hidrogramas observados, derivados de registros minuto a minuto da variação do nível d'água na seção de controle do canal que recebe a drenagem de grande parte da área do campus da USP. Serão avaliadas às vazões de pico, a forma do hidrograma e os volumes de escoamento de cada método sob as mesmas condições de contorno.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise comparativa do desempenho dos três métodos de transformação chuva-vazão selecionados será realizada por meio de um estudo de caso em uma pequena bacia urbana real, localizada no município de São Paulo, Brasil, e seu comportamento observado na ocorrência de cinco eventos pluviométricos de diferentes intensidades, durações e distribuições temporais, ocorridos durante o mês de março de 2019. Cada evento corresponderá a um pluviograma e um hidrograma

observados através de uma estação pluviográfica, localizada dentro do campus da USP, a poucos metros da seção de controle do canal de drenagem monitorado neste estudo.

Cada um dos três métodos receberá como dado de entrada a chuva total correspondente ao evento e produzirá um hidrograma, considerando as perdas iniciais por infiltração e retenção superficial em seus respectivos métodos de geração de chuva excedente e transformação do excesso em vazão. O método do hidrograma unitário racional modificado usará o parâmetro C para a quantificação desse efeito, em quanto o método do NRCS utilizará o parâmetro CN, atrelado ao cálculo de perdas desenvolvido pelo NRCS. O método de Clark também utilizará a metodologia do NRCS para o cálculo da chuva excedente, também por meio do parâmetro CN.

O tempo de concentração da bacia, grandeza de elevado significado físico e fundamental importância na caracterização do hidrograma, será estimado por meio de fórmulas semi-empíricas, que correlacionam as características geomorfológicas da bacia ao desenvolvimento do escoamento. O método do Hidrograma Racional Unitário Modificado utilizará a fórmula proposta pelo FAA – Federal Aviation Agency, que atrela o tempo de concentração ao parâmetro C da bacia. Os métodos do NRCS e de Clark utilizarão a fórmula proposta pelo NRCS, a qual relaciona o tempo de concentração ao tempo de retardo da bacia, também atrelando a sensibilidade desse parâmetro às características geomorfológicas da bacia, porém por meio do parâmetro CN.

Os hidrogramas gerados por cada modelo para cada evento serão comparados com os hidrogramas reais registrados, tomando-se como referência a vazão máxima, o erro médio absoluto (MAE) das ordenadas de vazão e o volume total do hidrograma. Cada hidrograma observado foi derivado dos registros de nível d'água a cada minuto durante a ocorrência do evento de precipitação, por meio da curva-chave do canal de drenagem desenvolvida para a seção de controle analisada neste estudo. A intenção da elevada precisão temporal dos registros é observar com maiores detalhes a sensibilidade do canal à passagem da onda de cheia gerada por precipitações de diferentes durações, distribuições temporais e intensidades (inclusive precipitações de pequeno volume) e a capacidade dos modelos de simular essa sensibilidade.

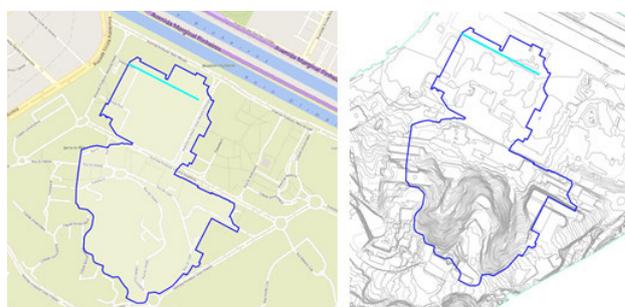
## 2.1 Caracterização da área de estudo

A bacia analisada neste estudo encontra-se localizada internamente ao campus da Universidade

de São Paulo e possui uma área de 1,089 km<sup>2</sup>, a qual foi determinada após a análise cruzada da topografia, por meio do modelo digital de terreno, com as informações do levantamento cadastral das redes de drenagem do campus, ambos fornecidos pela administração central da universidade. A figura 1 abaixo ilustra a área de estudo e a seção de controle do canal de drenagem onde foram realizadas as medições da variação do nível d'água.



**Figura 1.** Imagem aérea e delimitação da bacia de estudo (fonte: Google Earth).

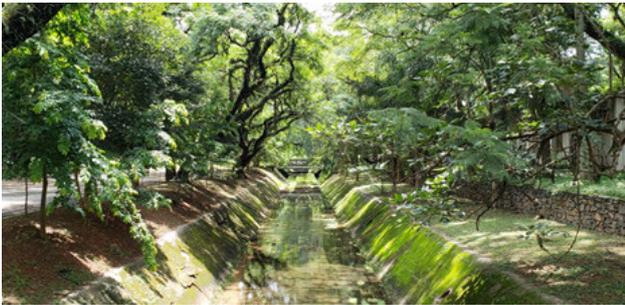


**Figura 2.** Delimitação da bacia em um mapa extraído do GoogleMaps (esq.) e em um modelo digital da topografia (dir.).

## 2.2 Monitoramento dos eventos

Para o registro da vazão escoada em cada evento foi estabelecida uma seção de controle em um canal para a qual foi estimada uma curva de descarga. Nesta seção foi estimado um registrador de nível ultrassônico com precisão de 0,25 centímetros e frequência de aquisição de 1 minuto, de modo a captar com precisão a resposta hidrológica da bacia para precipitações de diferentes características temporais e testar a aderência dos modelos a essa sensibilidade. O sensor foi instalado na face inferior

do tabuleiro de uma ponte de pedestres sobre o canal de drenagem da área de estudo. Extamente abaixo dessa ponte é a seção de estudo para a qual foi desenvolvida a curva chave do canal. O sensor utiliza tecnologia de um processador arduíno e um cartão de memória micro SD que registra os dados de altura d'água de minuto a minuto e os registra no cartão, que é posteriormente colhido e descarregado em computador pessoal.

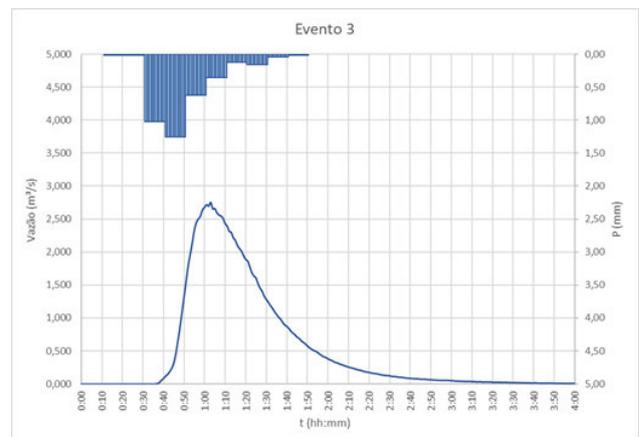
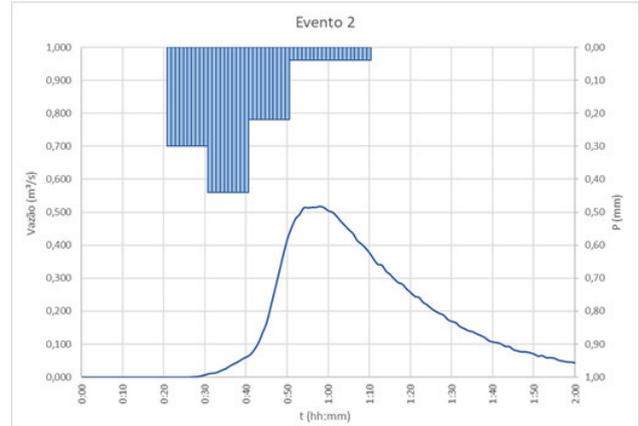
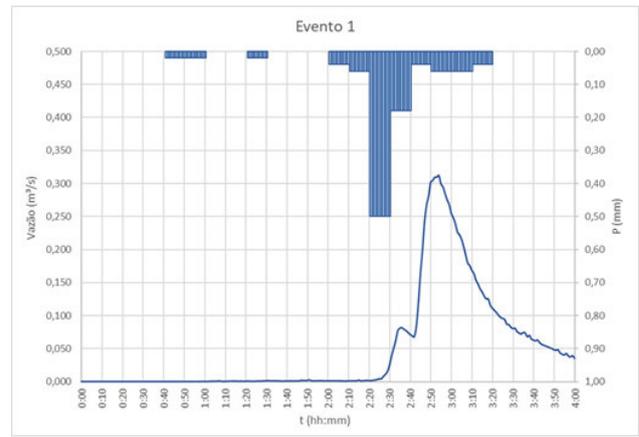


**Figura 3.** Canal de drenagem na seção de monitoramento do nível d'água.

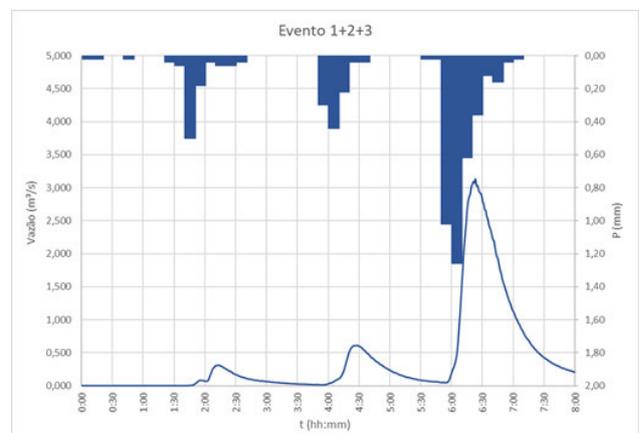


**Figura 4.** Sensor ultrassônico e local de aferição de medidas.

Os hietogramas correspondentes aos eventos registrados pelo sensor foram obtidos do banco de dados do SAISP – Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo ([www.saisp.br](http://www.saisp.br)), que monitora em tempo real a altura de precipitação de diversos pontos da bacia do Alto Tietê, onde se encontra a microbacia deste estudo. Foram então utilizados os dados do pluviômetro do CTH-USP, o qual é localizado a 480 metros do local da seção de estudo. No total foram registrados 9 eventos, de diferentes durações e intensidades, dos quais 5 foram selecionados para a calibração dos modelos analisados. As figuras abaixo mostram cada um dos eventos selecionados, combinando o hietograma e o hidrograma correspondente.



**Figura 5.** Eventos monitorados: hietogramas e hidrogramas correspondentes.



**Figura 6.** Eventos monitorados: hietogramas e hidrogramas correspondentes - continuação.

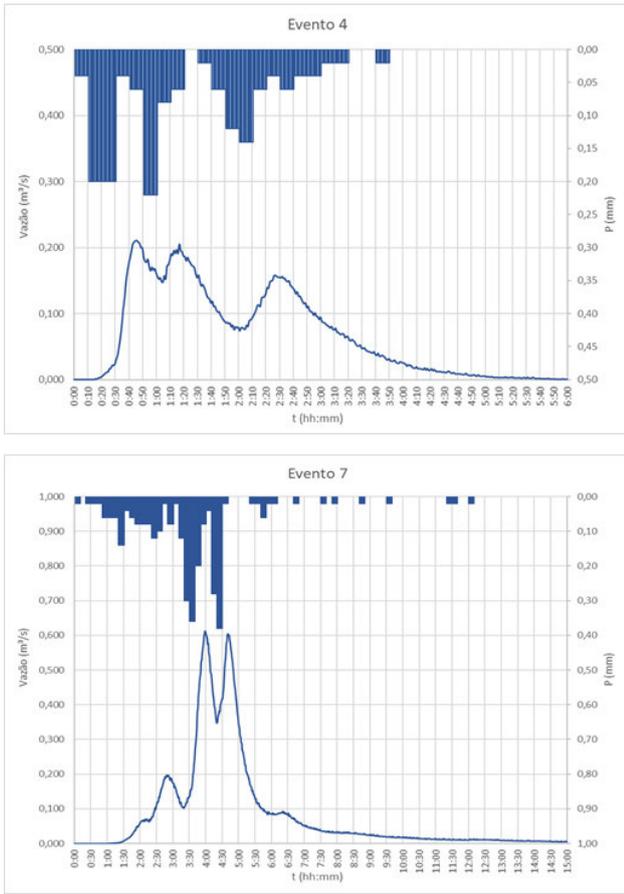


Figura 6. Eventos monitorados: hietogramas e hidrogramas correspondentes - continuação.

### 2.3 Calibração dos modelos

Para a análise foram estabelecidas três funções objetivos diferentes: a primeira considerando como parâmetro de otimização somente a vazão de pico; a segunda considerando somente a forma do hidrograma, expressa pelas ordenadas de vazão ponto a ponto e pelo tempo de pico; e a terceira considerando somente o volume máximo do hidrograma isoladamente. O critério utilizado para avaliar a qualidade da calibração dos modelos em relação à vazão máxima e ao volume máximo foi o erro percentual entre os valores calculados e observados, conforme expressas pelas equações 1 e 2, abaixo:

$$E_{Q_{máx}} = \left| \frac{Q_{máx\ calc} - Q_{máx\ obs}}{Q_{máx\ obs}} \right| \quad (1)$$

$$E_{V_{máx}} = \left| \frac{V_{máx\ calc} - V_{máx\ obs}}{V_{máx\ obs}} \right| \quad (2)$$

Já o critério utilizado para avaliar a qualidade da calibração dos modelos em relação à forma do hidrograma foi o MAE (*Mean Absolute Error*) que indica o erro médio absoluto das ordenadas de vazão, e o erro percentual entre os valores calculados

e observados do tempo de pico, cujas relações são indicadas pelas equações 3 e 4, respectivamente, abaixo:

$$MAE_Q = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{calc_i} - Q_{obs_i}}{n} \right| \quad (3)$$

$$E_{t_p} = \left| \frac{t_{p\ calc} - t_{p\ obs}}{t_{p\ obs}} \right| \quad (4)$$

As funções objetivo para cada parâmetro foram então construídas de forma a minimizar os valores dos erros ajustando-se os parâmetros relativos às perdas por infiltração e efeitos de retenção superficial concentradas no parâmetro C, no caso do método racional, e CN, no caso do método do NRCS, usado também para Clark.

$$F.O._1 = \min(E_{Q_{máx}}) \quad (1)$$

$$F.O._2 = \min(E_{V_{máx}}) \quad (2)$$

$$F.O._3 = \min(MAE_Q + E_{t_p}) \quad (3)$$

Muitos trabalhos costumam apresentar o RMSE (Root Mean Squared error) alternativamente ao MAE, porém o RMSE apresenta algumas limitações, sobretudo na forma como pode tornar pouco clara e objetiva a interpretação do erro medido (Willmott and Matsuura 2005), e, portanto, será descartado para esta análise.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

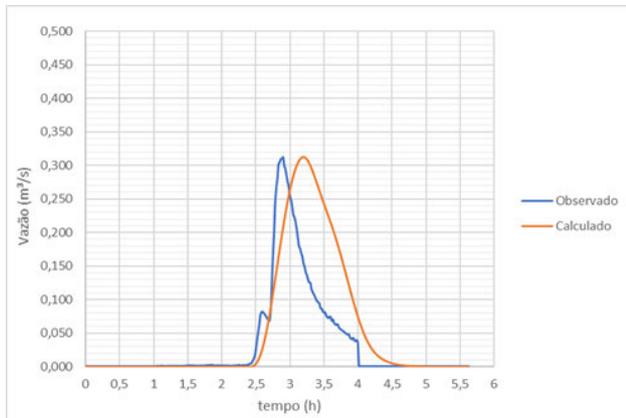
Cada um dos 5 eventos selecionados, e, também, o hidrograma dos eventos 1, 2 e 3 em sequência, foi simulado com os três métodos de transformação chuva-vazão e para as três funções objetivo estabelecidas em 2.3, totalizando 54 cenários de simulação. Cada cenário é calibrado para uma das 3 funções objetivo, mas também é avaliado em relação aos outros critérios de erro, sendo que o erro total é obtido pela soma da F.O. otimizada e os valores obtidos para os demais critérios eq. (1) a (4).

Tabela 1. Melhor evento simulado para cada método.

	Σ Erros	Evento	FO	Q
HRUM	0,462	7	FO2	0,612
NRCS	0,413	7	FO1	0,612
<b>CLARK</b>	<b>0,377</b>	<b>1</b>	<b>FO1</b>	<b>0,312</b>

A tabela 1 acima mostra o evento simulado com o menor erro total para cada um dos três métodos. O método que apresentou a melhor performance (o menor erro total, somando-se a F.O. otimizada e

os outros critérios de erro) foi o Método de Clark, calculado para o evento 1 e otimizado pela F.O.1, relativa à vazão máxima, cujo erro total foi calculado em 0,377, apresentado no hidrograma abaixo.



**Figura 7.** Cenário da melhor simulação: Método de Clark, Evento 1, F.O.1.

No entanto, considerando o desempenho geral dos 54 cenários simulados, nota-se duas conclusões importantes: em primeiro lugar, a F.O.2 foi a função objetivo que apresentou os melhores resultados de calibração considerando-se a soma dos erros de todas as simulações que foram calibradas pelo volume máximo, incluindo-se os erros dos outros critérios de performance relacionados; em segundo lugar, o Método de Clark foi o que apresentou os melhores resultados de calibração considerando a soma dos erros de todas os cenários simulados e considerando a calibração para as 3 F.O. No entanto, como não se realizou a calibração otimizando-se simultaneamente as 3 F.O.'s, vale ressaltar que cada F.O. apresentou um método específico mais aderente, conforme é possível inferir da tabela 2, a seguir.

**Tabela 2.** Soma dos erros de todas as simulações.

	HRUM	NRCS	CLARK	Σ Erros
FO1	11,334	8,337	<b>7,317</b>	26,988
<b>FO2</b>	<b>6,564</b>	<b>7,805</b>	<b>9,521</b>	<b>23,890</b>
FO3	8,581	11,471	<b>9,284</b>	29,337
<b>Σ Erros</b>	26,479	27,613	<b>26,123</b>	

#### 4. CONCLUSÕES

As verificações indicam, a princípio, que o Método do Hidrograma Unitário Racional Modificado é o método que produz a pior aderência aos valores observados quando a calibração é realizada pela vazão máxima, F.O.1. No entanto, foi o método que apresentou a melhor performance geral quando a calibração é realizada pela otimização do volume

máximo, F.O.2. Ainda, em uma análise global, a calibração dos modelos pela vazão máxima, F.O.2, foi a que produziu os menores erros totais, sendo por tanto, a que menos influencia negativamente os demais parâmetros do hidrograma em benefício da otimização própria. No contexto do dimensionamento de estruturas de detenção em ambiente urbano, entende-se que a vazão máxima isoladamente não é suficiente para a adequada estimativa da evolução dos volumes de escoamento superficial no tempo, sendo, portanto, necessária a estimativa adequada dos volumes e da forma do hidrograma de cheia. Dessa maneira, os resultados sugerem que a simulação de eventos de projeto pelo Hidrograma Racional Unitário Modificado calibrado pela otimização dos volumes produziria os melhores resultados para o projeto de estruturas de detenção associadas à drenagem de pequenas bacias em ambiente urbano. Ainda assim, mais estudos de caso semelhantes ainda seriam necessários para a confirmação dos indícios apontados neste estudo.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ANA – Agência Nacional de Águas através do Projeto CAPES/ANA – MOMA, e à FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica pela viabilização da instrumentação usada na pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

CLARK, C. O. Storage and the unit hydrograph: Transactions. American Society of Civil Engineers [Em linha]. vol. 110, n°2261 (1945), p.1419-1488. [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: [http://ponce.sdsu.edu/clark\\_paper\\_portrait.pdf](http://ponce.sdsu.edu/clark_paper_portrait.pdf)>.

INNOCENTE, C.; CHAFFE, P. L. B. Uma revisão preliminar sobre a aplicação do hidrograma unitário na pesquisa, no ensino e na engenharia. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil (2017). [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: [http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-598\\_uma-revisao-preliminar-sobre-a-aplicacao-do-hidrograma-unitario-na-pesquisa-no-ensino-e-na-engenharia](http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-598_uma-revisao-preliminar-sobre-a-aplicacao-do-hidrograma-unitario-na-pesquisa-no-ensino-e-na-engenharia)>

MASCARENHAS, F. et al. On-site stormwater detention as an alternative flood control measure in ultra-urban environments in developing countries. In: Seventh IAHS Scientific Assembly at

Foz do Iguaçu., At Foz do Iguaçu, Brazil. [Em linha]. vol. 110, nº293 (2005), p.196-203. [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <https://iahs.info/uploads/dms/13112.32%20196-202%20s2-06%20Mascarenhas%2061.pdf>>

NRCS. Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C. (1957).

SEIBT, A. C. *et al.* Comparação das vazões de projeto pelo método racional e método tempo área para bacias urbanas do município de Goiânia – GO. REEC - Revista eletrônica de engenharia civil. [Em linha] vol. 4, nº2 (2012). [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/19513>>

TASSI, R. Comparação de duas metodologias para determinação do volume de detenção em pequenas bacias urbanas: O Caso De Porto Alegre/RS. Universidade Federal de Santa Maria.

In: Congreso nacional del agua e III simpósio de recursos hídricos del cono sur. (2005). [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.irrigacion.gov.ar/conagua2005/>>

WILKERSON, J. L.; MERWADE, V. M. Determination of Unit Hydrograph Parameters for Indiana Watersheds. Technical Release, final report. Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana (2010). [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <https://docs.lib.purdue.edu/jtrp/1124/>>

WILLMOTT, C. J. & K. MATSUURA. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate research. Vol. 30, nº1 (2005), p. 79-82. [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v30/n1/p79-82/>>