

XII ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS

RELAÇÃO ENTRE CARACTERÍSTICAS DO EVENTO CHUVA-VAZÃO E DESEMPENHO DE MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO

*Samanda Costa do Nascimento*¹; *Sarah Veeck*²; *Fagner França da Costa*³ & *Adriano Rolim da Paz*⁴

RESUMO

Modelos hidrológicos são uma ferramenta de grande utilidade para auxílio ao gerenciamento dos recursos hídricos, havendo diferentes formulações propostas na literatura. Para estudos em pequenas bacias urbanas, ainda prevalece a abordagem concentrada. Entretanto, há mais de duas décadas a simulação hidrológica obteve vantagens do aprimoramento de Sistemas de Informação Geográfica, somado ao crescimento da capacidade computacional e maior disponibilidade de informações de terreno, possibilitando o desenvolvimento e aprimoramento de modelos hidrológicos distribuídos (MHD), que consideram a variabilidade temporal e espacial das bacias hidrográficas. Este trabalho avalia o desempenho de um MHD em função das características dos eventos simulados, considerando duas sub-bacias (Cascata I, 4,93 km² e Saint-Hilaire, 5,94 km²) da bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio (Porto Alegre e Viamão, RS). Apesar das limitações do estudo, incluindo as incertezas associadas aos dados observados, essa forma de compreender os resultados da MHD tem potencial para direcionar o aprimoramento da formulação da modelagem ou representação de dados. Nesse caso, com o indicativo de vencer a maior deficiência que foi relacionada a simular adequadamente os maiores retardos das vazões de pico, principalmente quando ocorreram maiores precipitações no início do evento chuvoso.

ABSTRACT

Hydrological models are a very useful tool to water resources management, with distinct approaches proposed in literature. For studying small urban catchments, the use of lumped approaches still prevails. However, since more than two decades the hydrological simulation has been aided by Geographic Information Systems together with the increasing computational power and larger availability of terrain information, allowing the developing and improvement of distributed hydrological models (DHM), which take into account the temporal and spatial variability of the watersheds. This work evaluates the performance of a DHM as a function of the characteristics of the observed events, considering two catchments (Cascata I, 4,93 km² and Saint-Hilaire, 5,94 km²) of the Arroio Diluvio watershed (Porto Alegre and Viamão, RS). Despite of limitations of this study, including uncertainties of observed data, this way of understanding the DHM results has potential to show the way towards improving the model formulation or data representation, in this case has showed the need to overcome the largest deficiency related to adequately simulating the peak discharge delay, mainly when the largest precipitation rates occurred in the beginning of the rainfall event.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológica distribuída, curve-number, hidrograma unitário

¹) Acadêmica de Eng. Ambiental, Centro de Tecnologia, UFPB, João Pessoa – PB. Fone: (83) 99986-7229, samandacosta93@gmail.com

²) Eng. Civil e MSc. Eng. Civil e Ambiental. João Pessoa – PB, sarah_veeck@yahoo.com.br

³) Eng. Ambiental e MSc. Eng. Civil e Ambiental. João Pessoa – PB, fagnerengenheiroambiental@gmail.com

⁴) Eng. Civil e Prof. Doutor do Departamento de Eng. Civil e Ambiental, CT/UFPB, João Pessoa – PB, adrianorpaz@yahoo.com.br

1 - INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos têm se apresentado como uma ferramenta extremamente útil para tomada de decisões relativas ao uso dos recursos hídricos (Fan e Collischonn, 2014), sendo utilizados em diversos tipos de análises hidrológicas (Pontes *et al.*, 2015). A escolha do tipo de modelo hidrológico varia de acordo com a disponibilidade dos dados, tempo de processamento, características da região estudada e propósito do estudo.

Estudos recentes vêm propondo melhorar a representatividade das características físicas das bacias hidrográficas, através de modelos hidrológicos distribuídos (MHD). Tais modelos subdividem a bacia hidrográfica em unidades menores, que podem ser células regulares, que são entendidas pelo modelo como pequenas bacias hidrográficas (Paz *et al.*, 2011).

Em razão da natureza variável no espaço e tempo dos processos hidrológicos como a precipitação, infiltração e escoamento, os modelos de simulação hidrológica tradicionais como o método da precipitação excedente, teorema do hidrograma unitário e a teoria do hidrograma unitário sintético triangular apresentam limitações quanto a essas variações. Em razão da limitação dessa variabilidade, estudos tem sido desenvolvidos para adaptar tais abordagens para considerar a variabilidade das características físicas da bacia hidrográfica de forma distribuída por pixel (e.g. Melesse e Graham, 2004).

Para a simulação hidrológica de áreas urbanas, apesar dos métodos tradicionais ainda serem muito utilizados, a crescente disponibilidade de informações espacialmente distribuídas, como dados topográficos, de precipitação, uso e cobertura dos solos, somada à possibilidade de interação entre eles e o uso de Sistemas de Informação Geográfica, fornece a estrutura para o desenvolvimento, verificação e eventual aceitação de novos modelos hidrológicos (Melesse e Graham, 2004). Tais autores desenvolveram e aplicaram um MHD para simulação chuva-vazão em áreas urbanas, constatando desempenho variável em função das características do evento chuvoso, com melhor desempenho para as tormentas que tiveram altos valores de condição de umidade antecedente do solo e moderados valores precipitados.

Nesse contexto, uma abordagem espacialmente distribuída ao nível de pixel a partir do processamento de Modelo Digital de Elevação (MDE) e baseada em métodos de chuva excedente e hidrograma unitário foi desenvolvida e apresentada em Costa (2017) e Veeck (2018). Tais estudos simularam 18 eventos para a sub-bacia de Saint-Hilaire e 21 eventos para a sub-bacia Cascata I, localizadas em Porto Alegre e Viamão (RS), com diferentes desempenhos da modelagem hidrológica ao longo dos eventos. Este trabalho teve por finalidade avaliar a relação entre o desempenho do

modelo hidrológico em cada evento das bacias hidrográficas referidas relativamente às características do evento chuva-vazão.

2 - METODOLOGIA

2.1 - Área de estudo

A área de estudo compreende duas sub-bacias hidrográficas, Cascata I (4,93 km²) e Saint-Hilaire (5,94 km²), pertencentes à bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio, que se localiza nos municípios de Porto Alegre e Viamão (Figura 1).

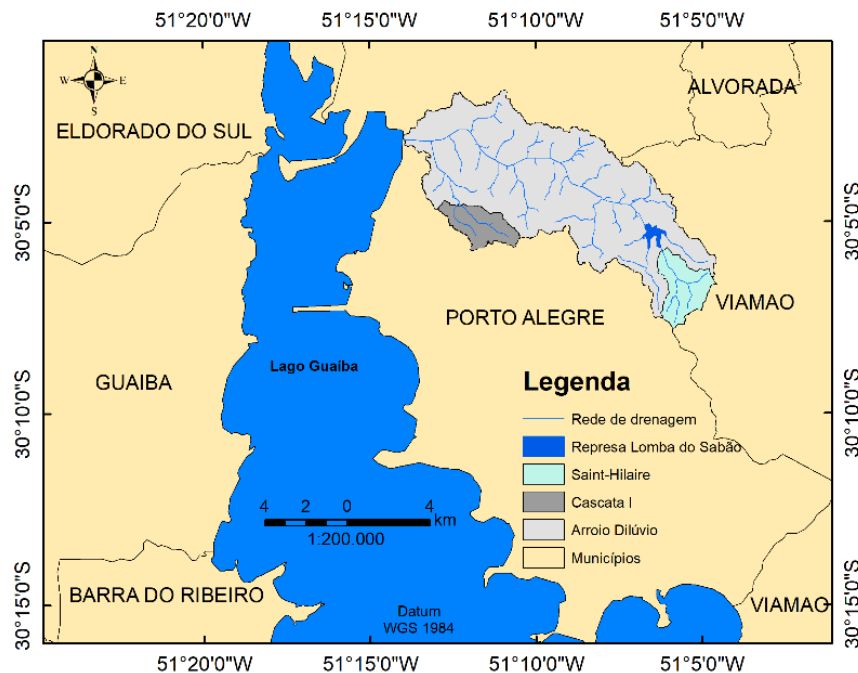


Figura 1. Localização das sub-bacias Cascata I e Saint-Hilaire

Segundo levantamento feito por Costa (2017) a partir de imagens de satélite da década de 80, a sub-bacia Cascata I apresentava 29% de vegetação e 71% de área urbana à época. A partir desse levantamento e com adaptações, Veeck (2018) caracterizou a sub-bacia Saint-Hilaire como 73% de cobertura vegetal, 15% de solo exposto e 12% de área urbana.

2.2 - Dados disponíveis

Os dados de chuva e vazão utilizados neste estudo são provenientes do Projeto Dilúvio, que monitorou a bacia de Arroio Dilúvio entre os anos 1978 e 1982. Nesse período, Porto Alegre chegou a ser monitorada por 11 linígrafos e 14 pluviógrafos (Silveira, 2000).

Segundo Costa (2017) e Veeck (2018), a escolha de eventos por sub-bacia foi mediante a análise visual dos hidrogramas dos dados observados, verificando se possuíam características de um hidrograma completo, ou seja, com ascensão e recessão. Sendo assim, foram utilizados 21 eventos da sub-bacia Cascata I e 18 eventos para a sub-bacia Saint- Hilaire, todos com passo de tempo de 30 min. Para a modelagem hidrológica distribuída foi utilizado o MDE de 30m proveniente dos dados orbitais do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para a sub-bacia Cascata I, e para a sub-bacia de Saint-Hilaire foi utilizado MDE oriundo de dados coletados por sistema LiDAR (Light Detection and Ranging) a bordo de uma aeronave (Brandalize, 2002; Giongo *et al.*, 2010). O sistema LiDAR consiste basicamente na emissão de pulsos laser de elevada frequência de repetição por uma plataforma aérea ou terrestre (Giongo *et al.*, 2010). A varredura a laser produz uma nuvem de pontos em três dimensões que podem ser agrupados em modelos digitais de elevação de alta resolução espacial (Liu *et al.*, 2005; Zhi e Zhong, 2008; Höfle e Rutzinger, 2011).

2.3 - Modelagem hidrológica distribuída

Para a utilização do MHD por pixel, de acordo com a metodologia proposta por Costa (2017) e Veeck (2018), deve-se seguir as seguintes etapas (Figura 2): i) seleção e caracterização de dados de chuva e de vazão da bacia; ii) processamento básico do MDE para caracterização da rede de drenagem e delimitação da bacia hidrográfica; iii) aplicação de abordagem distribuída através das rotinas computacionais que compõem o sistema desenvolvido e denominado *Hidropixel*. Nele, um conjunto de três rotinas computacionais desenvolvidas em linguagem de programação FORTRAN são aplicadas: a) cálculo do tempo de deslocamento do escoamento via adaptação da formulação do tempo de concentração do método NRCS (National Resources Conservation Service dos EUA), que considera equações diferenciadas para o percurso em superfície e em canais da drenagem; b) cálculo da chuva excedente via método Curve-Number (CN) do NRCS; c) cálculo e aplicação do hidrograma unitário triangular (HUT) proposto pelo NRCS.

Nessa abordagem, cada pixel é tratado como uma sub-bacia hidrográfica, de área igual à área superficial do pixel e sendo considerado o tempo de deslocamento do escoamento desse pixel até o exutório da bacia hidrográfica como tempo de concentração. Em função da combinação de tipo e uso do solo específico de cada pixel, tem-se seu CN, ajustado conforme a condição de umidade

anterior para cada evento. O parâmetro relativo às perdas iniciais na formulação NRCS-CN foi ajustado para cada evento. Analogamente, para cada pixel é computado um HUT e feita a convolução para o hietograma de chuva excedente do pixel e, posteriormente, todos os hidrogramas resultantes de cada pixel são somados para computar o hidrograma final resultante do evento chuvoso. Detalhes metodológicos do sistema Hidropixel são apresentados em Costa (2017) e Veeck (2018).

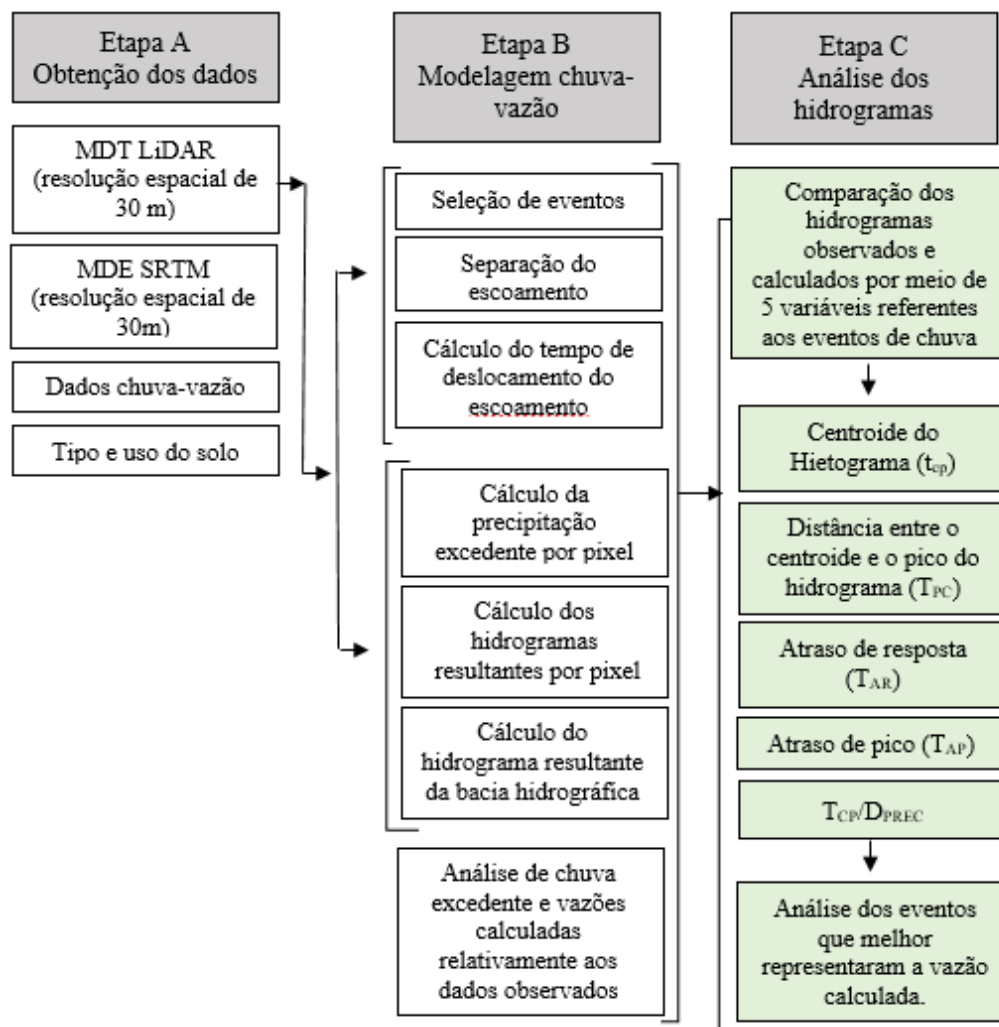


Figura 2. Etapas metodológicas

2.3 - Caracterização dos eventos chuva- vazão

Cada evento chuva-vazão foi caracterizado por cinco variáveis, baseando-se em Dingman (2008) e na sequencia foram feitas análises que possibilitaram o entendimento do comportamento dos eventos chuvosos e dos hidrogramas calculados pelo modelo hidrológico distribuído (Figura 2). As variáveis de caracterização dos eventos chuvosos foram (Figura 3): distância entre o centroide do hietograma (centro de massa) e o pico do hidrograma (T_{PC}); o atraso de resposta (T_{AR}), definido como

o intervalo de tempo entre o início do hietograma e o início do hidrograma; o tempo entre o início da precipitação e o pico do hidrograma, também chamado de atraso de resposta (T_{AP}); e a variável T_{CP}/D_{PREC} que consiste na divisão do T_{PC} pela duração da precipitação, sendo todas as variáveis mencionadas representadas em horas.

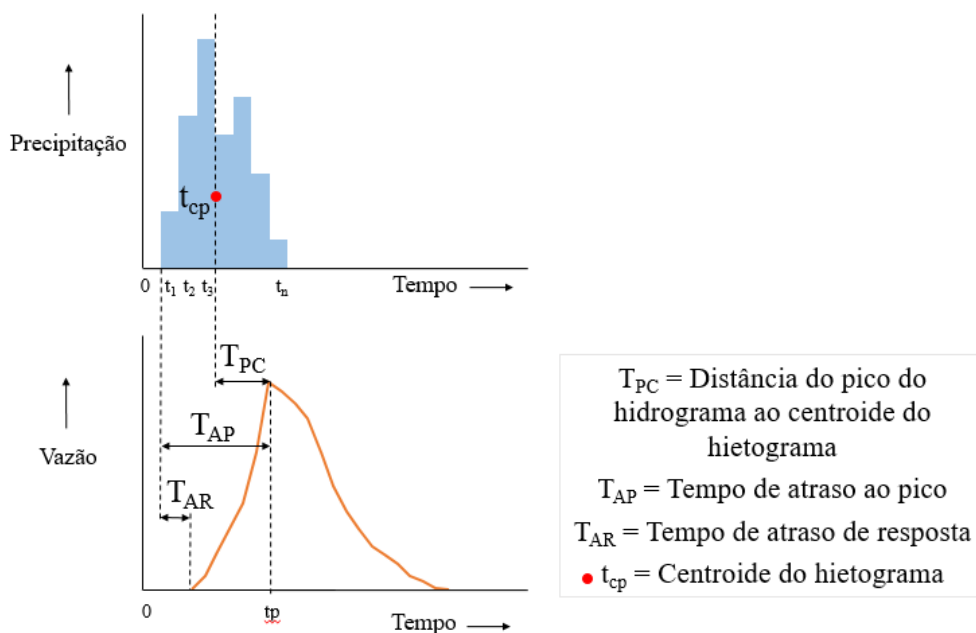


Figura 3. Caracterização dos eventos chuva-vazão

3 – RESULTADOS

3.1 - Sub-bacia Saint-Hilaire

Analisando os valores das variáveis calculadas para a sub-bacia Saint-Hilaire, observou-se três tipos de padrões com relação à variável T_{CP}/D_{PREC} . No primeiro padrão, $T_{PC}/D_{PREC} < 0,7$ e ocorreu em 8 eventos, dos quais 7 apresentaram uma diferença entre o tempo de pico dos hidrogramas calculados (Q_{calc}) e os observados (Q_{obs}) menores que 26%, considerando as durações dos eventos de chuva (D_{prec}). No segundo padrão, T_{CP}/D_{PREC} variou entre 0,7 e 1, ocorrendo esse comportamento em 6 eventos, dos quais cinco apresentaram maiores defasagens entre o pico de Q_{calc} e Q_{obs} , representando de 34% a 86% de D_{prec} . No terceiro padrão, $T_{PC}/D_{PREC} > 1$ e foi o padrão que mais apresentou defasagem entre os picos de Q_{calc} e Q_{obs} . Nesse grupo de 4 eventos, 3 deles apresentaram defasagens acima de 200% superior a D_{prec} .

Por meio da análise de agrupamento de características foi possível perceber que, para a maioria dos eventos, observou-se que os maiores valores de T_{PC}/D_{PREC} resultaram em maiores defasagens

entre picos de Q_{calc} e Q_{obs} , em alguns eventos ultrapassando 2,8 h. Para esses eventos percebeu-se um pico elevado de volume precipitado no primeiro instante, já no instante seguinte o volume precipitado menor. Em contrapartida, os eventos cujo valor de T_{PC}/D_{PREC} apresentaram-se menores, ocorreu menor defasagem entre Q_{calc} e Q_{obs} , sendo esses em geral eventos com precipitação bem distribuída e com maiores durações.

Em relação ao volume precipitado dos eventos, observou-se que eventos com precipitações maiores de 27 mm tiveram a relação $T_{PC}/D_{PREC} < 1$, e as defasagens entre Q_{calc} e Q_{obs} com valor médio de 33% de diferença em relação à duração da chuva. O que mostra que para eventos desse tipo (maior precipitação) o erro da modelagem foi menor quando em comparação com os eventos de maiores intensidades.

Os resultados da variável T_{AR} variaram de evento para evento em um intervalo de 0 a 5,5 h. Dos 18 eventos analisados, em 11 o MHD antecipou o pico de vazão, sendo que em 8 deles houve pico de precipitação no primeiro instante. Já a variável T_{AP} apresentou valores de 3 a 15 h, e dos 18 eventos simulados, 17 tiveram T_{AP} de Q_{calc} maior que de Q_{obs} , devido à tendência de antecipação dos picos de vazão pelo MHD. A Figura 4 apresenta os valores das variáveis calculadas para seis dos 18 eventos chuva-vazão com grandes picos de precipitação e eventos com maiores durações.

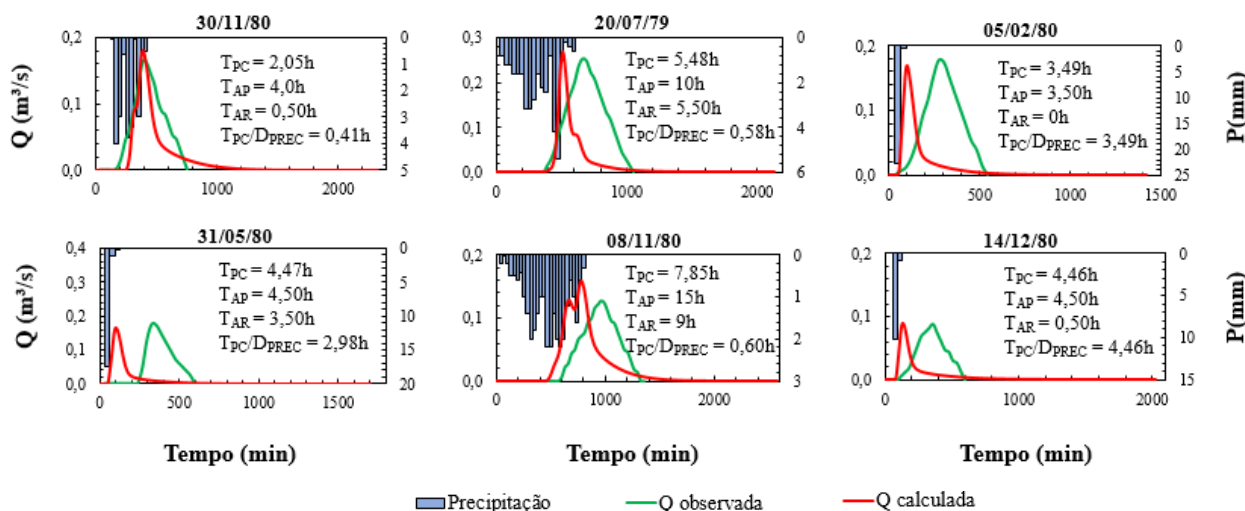


Figura 4. Hidrogramas calculados e observados e variáveis descritivas - sub-bacia Saint-Hilaire.

3.2 Sub-bacia Cascata I

Diferente do que ocorreu para a sub-bacia Saint-Hilaire, a sub-bacia Cascata I não foi de clara identificação a relação entre a variável T_{PC}/D_{PREC} e a defasagem entre Q_{calc} e Q_{obs} . No entanto, observou-se que os valores da variável T_{PC}/D_{PREC} variaram de 0,12 a 1,98, sendo os maiores valores

representados por eventos que apresentaram grandes volumes precipitados no primeiro ou no segundo instante de tempo (Figura 5).

Apesar da relação não tão clara, por meio dessa variável T_{PC}/D_{PREC} foi possível dividir os eventos em três padrões de comportamento. No primeiro, representado por treze eventos, $T_{PC}/D_{PREC} < 0,7$ e defasagens entre Q_{calc} e Q_{obs} variando de 7% a 45% do tempo de duração da chuva, dos quais, 7 tinham picos de precipitação no primeiro ou no segundo instante de tempo. O segundo comportamento foi registrado em 5 eventos, nos quais T_{PC}/D_{PREC} variou de 0,7 a 1, e a defasagem entre Q_{calc} e Q_{obs} variou de 45% e 68% da duração da chuva. Desse grupo, 3 eventos apresentaram picos de vazões no primeiro instante e outros dois tiveram comportamentos diferentes. O terceiro grupo foi composto por 3 eventos, os quais apresentam $T_{PC}/D_{PREC} > 1$ e em todos eles a defasagem entre Q_{calc} e Q_{obs} foi maior que 68%, em relação a duração do evento. Para este grupo todos os eventos tiveram picos de vazões no primeiro ou no primeiro e segundo instantes. Sendo assim percebeu-se que, apesar do agrupamento em três grupos de T_{PC}/D_{PREC} assim como na sub-bacia de Saint-Hilaire, não foi possível caracterizar o desempenho do MHD em função das características do evento chuva-vazão. A Figura 5 mostra os valores das variáveis calculadas para 6 dos 21 eventos, sendo mostrados aqueles com diferentes defasagens entre Q_{calc} e Q_{obs} .

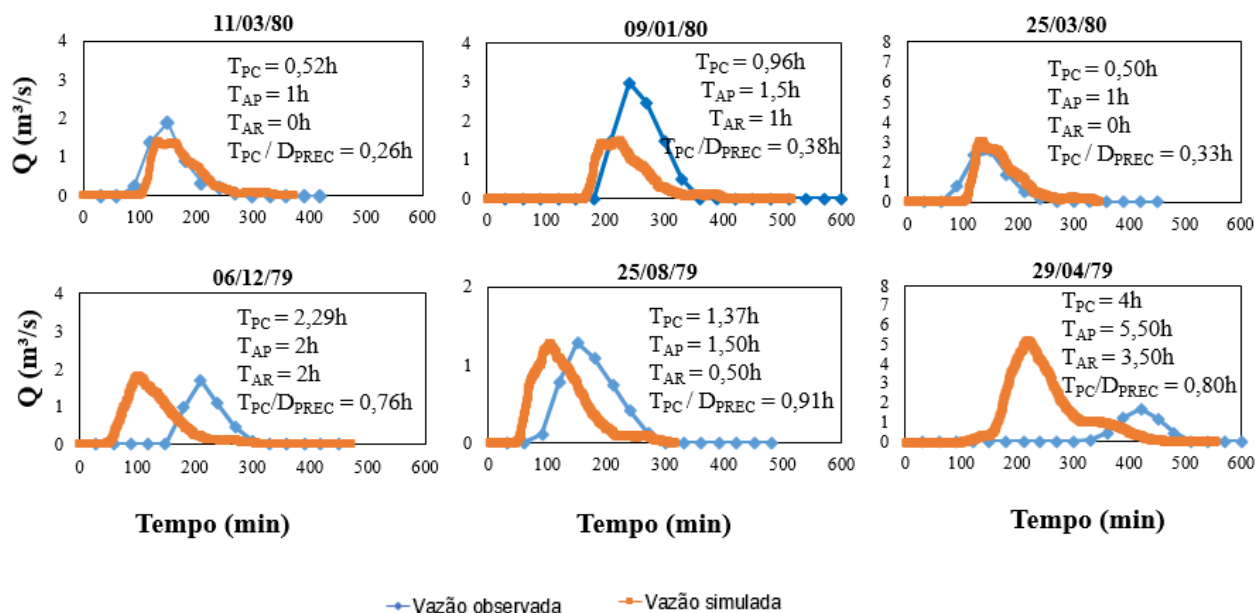


Figura 5. Hidrogramas calculados e observados e variáveis descritivas - sub-bacia Cascata I.

Em relação aos valores da variável T_{AR} , os eventos da sub-bacia Cascata I apresentaram valores variando de 0 a 3,5 h, com 6 eventos apresentando valores zero, isso se explica pelo fato do passo de tempo da precipitação e da Q_{obs} serem de 30min, porém caso tivessem sido monitorados com discretização menor possivelmente isso não ocorreria. Por meio dessa variável identificou-se

que em 17 dos 21 eventos a Qcalc antecipou-se em relação a Qobs, notando-se uma clara tendência do MHD em antecipar a vazão observada. A variável TAP variou de evento para evento com valores entre 0,5 e 5,5 h, e assim como a variável TAR foi possível identificar que a modelagem tendeu a antecipar os picos de vazões, ocorrendo a antecipação em 20 dos 21 eventos analisados.

4 – CONCLUSÃO

Por meio desse estudo foi possível demonstrar que a observação das características dos eventos e do comportamento dos hidrogramas através da adoção de variáveis é uma alternativa para melhor entender o processo chuva-vazão, uma vez que as variáveis permitem apontar quais eventos têm maior chance de apresentar maiores defasagem entre os hidrogramas observados e calculados.

Para a sub-bacia Saint-Hilaire, a relação entre o intervalo de tempo desde o centroide do hidrograma até o tempo de pico do hidrograma e a duração da precipitação (T_{PC}/D_{PREC}) foi a característica que melhor explicou os diferentes desempenhos do MHD. Constatou-se que nos eventos com grandes volumes precipitados em um curto espaço de tempo a modelagem apresentou erros mais consideráveis, antecipando o pico de vazão, diferente do que ocorreu para eventos com maiores durações, em que os erros de defasagem dos picos de vazão foram menores. Em contrapartida, para a sub-bacia Cascata I, a mesma variável T_{PC}/D_{PREC} não permitiu identificar com clareza quais as características dos eventos que melhor explicam um maior erro de defasagem nos hidrogramas.

Em relação as variáveis T_{AP} e T_{AR} observou-se que para a sub-bacia de Saint-Hilaire os valores foram mais altos, em comparação aos valores da sub-bacia de Cascata I, porém esta diferença é explicada pelas características físicas da bacia, como uso do solo, que interferem diretamente tanto no tempo de atraso de pico como no atraso de resposta do hidrograma.

Apesar das limitações do estudo, incluindo as incertezas associadas aos dados observados, essa forma de compreender os resultados da MHD tem potencial para direcionar o aprimoramento da formulação da modelagem, nesse caso com o indicativo de vencer a maior deficiência que foi relacionada a simular adequadamente os maiores retardos das vazões de pico, principalmente quando ocorreram maiores precipitações no início do evento chuvoso.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, por bolsa concedida ao 1º e 4º autores e pelo financiamento de projeto de pesquisa; à CAPES, por bolsa concedida ao 2º e 3º autores; ao Departamento de Esgotos Pluviais da Prefeitura de Porto Alegre (RS) pela cessão de dados para a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BRANDALIZE, A. A. (2002). *Perfilamento a Laser: comparação com métodos fotogramétricos*. Curitiba. Paraná. Disponível em: <http://www.lidar.com.br/arquivos/brandalizeperf.pdf>. Acesso em: 20 junho. 2018.
- COSTA, F. F. (2018). *Abordagem Distribuída para Simulação Chuva – Vazão em Pequenas Bacias Hidrográficas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p. 124.
- DINGMAN, S. L. (2008). *Physical Hydrology*. Waveland Press Inc, ed. 2, Long Grove, pp. 396-401.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. (2014). “Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 19, n.1, pp. 243-254.
- GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. (2010). *LiDAR: princípios e aplicações florestais*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 30, n. 63, pp. 231-244.
- HÖFLE, B.; RUTZINGER, M. (2011). *Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective*. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 55, n. 2, pp. 1-29.
- LIU, X.; PETERSON, J.; ZHANG, Z. (2005). *High-Resolution DEM Generated from LiDAR Data for Water Resource Management*. In: Zerger, A., Argent, R.M. (Eds.), *International Congress On Modelling And Simulation 'modsim05'*. Australia, Melbourne, pp. 1402–1408.
- MELESSE; A.M; GRAHAM, W. D. (2004). *Storm Runoff Prediction Based on a Spatially Distributed Travel Time Method Utilizing Remote Sensing oAnd GIS*. *Journal of the American Water Resources Association*. pp. 863 – 879.
- PAZ, A. R.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W. ; VICTORIA, D. C. ; ANDRADE, R. G. (2011). *Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x minibacias* in *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Maceió, Nov. 2011.
- PONTES, P. R.M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. (2015). *Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 20, no.4, pp. 888 – 904.
- SILVEIRA A. L. L. (2000). *Impactos Hidrológicos da Urbanização em Porto Alegre*. In: Tucci, C.E.M.; Marques, D.M. (2000). *Avaliação e Controle da Drenagem Urbana*, Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, pp 153-163.
- VEECK, S. (2018). *Modelagem Hidrológica de Pequenas Bacias Hidrográficas a Partir de Dados de Elevação Obtidos por Lidar*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p. 166.
- ZHI, X.; ZHONG, L. (2008). *A Progressive Quality Control to Improve the Accuracy of LiDAR Data Processing*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, v. 37, p. 421-425.