

## CALIBRAÇÃO DE MODELO CHUVA-VAZÃO PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA URBANA COM BASE EM DADOS DE PRECIPITAÇÃO INTEGRADOS – RADAR, SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

*Danilo Mildemberger de Oliveira<sup>1\*</sup> & José Eduardo Gonçalves<sup>2</sup>*

**Resumo** – A crescente urbanização das cidades e o consequente aumento do grau de impermeabilização do solo vem gerando uma série de impactos no ciclo hidrológico. Bacias sujeitas a urbanização apresentam considerável redução da infiltração de água da chuva no solo, aumentando o volume de água escoado superficialmente, sendo comum a ocorrência de inundações nestas bacias. Este trabalho teve como objetivo implementar o modelo hidrológico/hidráulico distribuído MOHID Land para a bacia hidrográfica do rio Belém, no município de Curitiba utilizando dados de precipitação integrados – radar, satélite e pluviômetro. Para a calibração do modelo, foram determinados 4 eventos de chuva com vazões consideradas críticas para uma seção transversal com área de drenagem de 42 km<sup>2</sup>. A eficiência do modelo foi calculada através da aplicação do coeficiente de Nash-Sutcliffe, que compara as vazões calculada pelo modelo e observada pela estação fluviométrica. Todos os eventos simulados apresentaram eficiência considerada boa ( $n > 0,75$ ), sendo o menor valor ( $n = 0,81$ ) determinado para o evento de maior intensidade de chuva. A melhor eficiência encontrada apresentou  $n = 0,96$ . Estes valores demonstram a confiabilidade do modelo para realizar previsão de vazões futuras.

**Palavras-Chave** – Hidrologia urbana; MOHID Land; Rio Belém

## CALIBRATION OF A RAINFALL-RUNOFF MODEL TO AN URBAN WATERSHED BASED ON INTEGRATED PRECIPITATION DATA – RADAR, SATELLITE AND RAIN GAUGE

**Abstract** – Development of big cities and the consequent increasing of impervious area has been generated impacts on hydrological cycle. Urban watersheds are subject to considerable reduction of rainwater infiltration capacity, increasing the occurrence of flooding on these watersheds. The goal of this work was to implement a distributed hydrologic/hydraulic model on Belém river watershed, located on the city of Curitiba, estimating rain intensity through radar, satellite and rain gauge integrated data. In way to calibrate this model, 4 rain events with critical flow rates were chosen to a cross section with drainage area of 42 km<sup>2</sup>. The model efficiency was calculated through Nash-Sutcliffe coefficient ( $n$ ), which compares modeled and observed flow rates. All of 4 events demonstrated a good efficiency ( $n > 0,75$ ). The event with higher rain intensity presented the lowest efficiency ( $n = 0,81$ ) among simulated events. The best efficiency resulted in value of  $n = 0,96$ . These values demonstrates that the model is capable to be used on future flow rates prediction.

**Keywords** – Urban hydrology; MOHID Land, Belém river

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA/UFPR; dmildemberger@ufpr.br.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico SIMEPAR; jose.eduardo@simepar.br.

## INTRODUÇÃO

Entre o final dos anos 60 até os anos 90, a população brasileira concentrada em áreas urbanas saltou de 55% para 76% (FGV, 1998), tendo a ocupação destes centros urbanos geralmente ocorrida em áreas próximas a rios e córregos. Para possibilitar o desenvolvimento urbano, estes corpos d'água foram retificados e canalizados a céu aberto ou enterrados em galerias, a fim de permitir a construção de ruas, praças e casas nas regiões de várzea. A alteração de um espaço natural para o meio urbano gera alterações no ciclo hidrológico, aumentando a ocorrência de inundações, o que causa uma série de impactos ambientais, sociais e econômicos.

Fendrich (1998) atribuiu à crescente urbanização do município de Curitiba o aumento no grau de impermeabilização da bacia hidrográfica do rio Belém, e, conseqüentemente, o aumento dos níveis de água no seu talvegue e os picos máximos das vazões de escoamento superficial. A combinação entre o aumento do volume de água escoado superficialmente e a redução da área de escoamento do canal vem resultando em recorrentes episódios de enchentes ao longo dessa bacia hidrográfica durante as últimas décadas.

O uso de modelos hidrológicos e hidráulicos vem sendo aplicado em diversas cidades com o objetivo de reduzir os impactos causados por chuvas intensas em áreas urbanizadas. A partir do conhecimento das características da bacia, é possível estimar as principais etapas do ciclo hidrológico, tornando possível determinar hidrogramas de cheia para diferentes eventos de precipitação. A aplicação de modelagem numérica gera informações importantes no gerenciamento sustentável de bacias hidrográficas, tornando a tomada de decisões para interferências estruturais mais barata e precisa.

O presente trabalho teve como objetivo calibrar o modelo hidrológico/hidráulico distribuído MOHID Land para uma seção transversal da bacia hidrográfica do rio Belém, com área de drenagem de 42 km<sup>2</sup>, utilizando chuvas estimadas pelo Sistema de Precipitação Integrado (SIPREC; Calvetti *et al.*, 2016), que gera um mapa de distribuição da chuva com resolução espacial de 1 km, através da interpolação de valores de chuva estimados por radares e satélites meteorológicos com a rede pluviométrica do Instituto Tecnológico SIMEPAR.

## ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Rio Belém (Figura 1) é a segunda maior bacia hidrográfica de Curitiba, com uma área de 87,7 km<sup>2</sup> representando 20,3% da área do município, tendo sua nascente na região norte da cidade, próximo à divisa com o município de Almirante Tamandaré, se estendendo por toda a região central de Curitiba e desaguando no rio Iguazú, no sul da cidade. Apesar de possuir menor tamanho em relação à bacia do Rio Barigui, é na bacia do Rio Belém que se concentra a maior parte da população curitibana, cerca de 48% dos habitantes, e também o maior índice de impermeabilização do solo, com cerca de apenas 13% de área permeável (Fendrich, 2002; IPPUC, 2008).

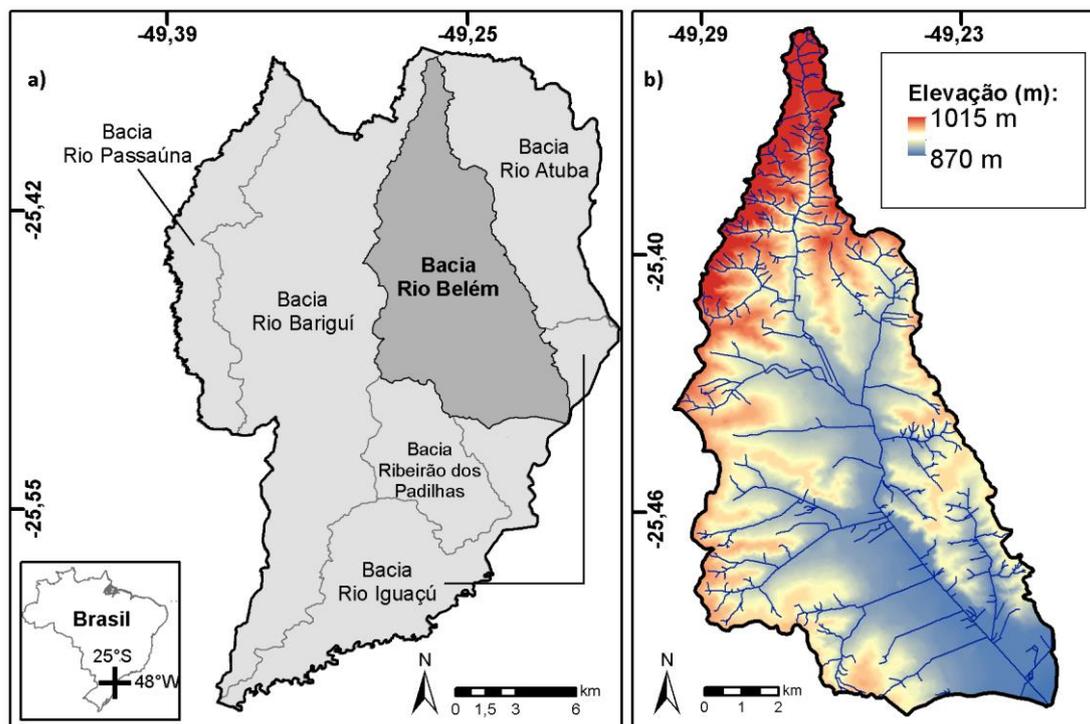


Figura 1 - Bacias hidrográficas localizadas no município de Curitiba (a), com enfoque para a topografia e hidrografia da bacia do rio Belém (b)

Fendrich (2002), analisando dados de chuva entre os anos de 1981 e 2001, determinou 25 eventos críticos de enchente na bacia hidrográfica do rio Belém, observou uma vazão máxima de 251,46 m<sup>3</sup>/s resultantes de uma chuva de intensidade igual a 82 mm/h, ocorrida em fevereiro de 1999, quando um volume de aproximadamente 3100 m<sup>3</sup> de água escoaram superficialmente na bacia.

Corroborando com isto, Lohmann (2011), analisando alagamentos ocorridos em sistemas de microdrenagem entre os anos de 2005 e 2010, determinou a ocorrência de 642 casos de alagamento nesta bacia, número menor apenas que o verificado na bacia do rio Barigui, que apresenta área 59% maior e apresentou 23% mais casos de alagamentos quando comparados à bacia do rio Belém.

## CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO/HIDRÁULICO

Os dados de precipitação foram obtidos através Sistema Integrado de Precipitação – SIPREC (Calvetti et al., 2006), desenvolvido com o objetivo de estabelecer uma cobertura espacial de eventos de precipitação de forma mais realística do que a interpolação de dados de pluviômetros. Este sistema integra a estimativa de chuvas através de quatro radares meteorológicos (Teixeira Soares e Cascavel, do Instituto Tecnológico SIMEPAR, e Bauri e Presidente Prudente, mantidos pelo IPMet) e de um satélite meteorológico (*Eumetsat Multisensor Precipitation Estimate – MPE*) com a rede hidrometeorológica do SIMEPAR, constituída por 115 estações pluviométricas distribuídas por todo o estado do Paraná, com espaçamento médio de 18 km entre estações. Esta integração tem como resultado final um mapa de distribuição da chuva com resolução espacial de 1 km e resolução temporal de 1 hora.

Os dados fluviométricos utilizados na calibração foram obtidos da estação fluviográfica Curitiba - Prado Velho/PUC, mantida pela Agência Nacional de Águas – ANA até o ano de 2014 em uma seção transversal com área de drenagem de 42 km<sup>2</sup>. Através da medição do nível do rio com intervalos de 15 minutos entre os anos de 2005 a 2012, e posterior aplicação destes dados à curva-

chave calculada para esta estação pelo Instituto das Águas do Paraná, foram determinados os valores de vazão para cada cota medida.

O domínio da grade numérica foi definido em forma de retângulo, abrangendo toda a área da bacia do rio Belém. Com espaçamento constante de 30 m, gerou-se uma malha com 225.000 células (360x625). Com a construção da grade numérica, a topografia do terreno foi computada através de interpolação pelo método de triangulação TIN (Triangular Irregular Network) do Modelo Digital de Elevação produzido por SUDERHSA (2000), com resolução espacial de 10 m. A partir da topografia gerada, foi realizado o delineamento da bacia hidrográfica e determinação dos canais de drenagem.

Após análise dos modelos implementados para a mesma bacia por Fendrich (1998), SUDERHSA (2007) e COBRAPE (2012) e a realização de testes com o modelo implementado por este trabalho, chegou-se aos parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para calibração do modelo

Coeficiente <i>Curve-Number</i> - CN	CN = 90
Coeficiente de Manning (n) para bacia	n = 0,035
Coeficiente de Manning (n) para rede de drenagem	n = 0,016
Cálculo do escoamento superficial na bacia	Modelo de Onda Dinâmica 2D
Cálculo do escoamento na rede de drenagem	Modelo de Onda Dinâmica 1D
Intervalo de tempo de cálculo	10 minutos sem chuva 1 minuto durante chuva
Número mínimo de iterações	5

A comparação estatística entre as vazões observadas e calculadas foram realizadas através da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970). O cálculo desse coeficiente é efetuado da seguinte forma, sendo  $Q_o$  a vazão observada;  $Q_c$  a vazão calculada; e  $\bar{Q}$  a vazão média observada.

$$\eta = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_c)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q})^2} \quad (1)$$

De acordo com Moreira (2005), o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma medida de associação entre as vazões observadas e calculadas. O valor do coeficiente pode variar entre  $-\infty$  e 1. Eficiência igual a 1 corresponde a uma correlação linear perfeita entre as vazões. Para Lopes et al. (2014), o desempenho do modelo é considerado adequado e bom quando o valor de NSE superar 0,75, enquanto valores entre 0,36 e 0,75 são considerados aceitáveis para estimar vazões futuras. Coeficiente menor ou igual a 0 demonstra a incapacidade do modelo em prever vazões.

## RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE CALIBRAÇÃO

Para a calibração do modelo chuva-vazão, foram escolhidos quatro eventos de chuva convectiva, ocorridos entre os anos de 2009 e 2012. Todos eventos apresentaram vazões superiores a 60 m<sup>3</sup>/s, valor que representa altura de coluna de água aproximada de 3,80 m, 0,5 m a menos que a altura máxima da seção transversal analisada. As principais características de cada um dos eventos simulados são apresentadas na Tabela 2, sendo  $P_t$  o valor total precipitado durante o evento, medido pela estação meteorológica do SIMEPAR;  $Q_{m\acute{a}x\ obs}$  a vazão máxima medida pela estação fluviométrica

Prado Velho/PUC ( $A_d = 42 \text{ km}^2$ ), e  $Q_{\text{máx calc}}$  é o valor máximo de vazão calculado pelo modelo. Em seguida, são discutidos os principais resultados dos hidrograma resultantes para cada evento, bem como a avaliação da eficiência do modelo para cada simulação.

Tabela 2. Características dos eventos utilizados para simulações de calibração

Data	$P_t$ (mm)	$Q_{\text{máx obs}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$h_{\text{obs}}$ (m)	$Q_{\text{máx calc}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$h_{\text{calc}}$ (m)	Eficiência ( $\eta$ )
19/11/2009	73	143	5,25	137	5,19	0,81
28/01/2010	49	71	4,3	65	4,05	0,88
02/04/2011	36	62	3,9	62	3,9	0,96
20/02/2012	42	70	4,25	68	4,17	0,90

De maneira geral, todos eventos simulados apresentaram valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe considerados bons ( $\eta > 0,7$ ). Os eventos com maiores valores de vazão apresentaram os menores coeficientes.

O evento do dia 19/11/2009 (Figura 2) apresentou coeficiente de eficiência de 0,81. Conforme verifica-se no hidrograma desta simulação, o tempo de pico calculado foi levemente superior ao observado, enquanto a vazão máxima resultante pelo modelo foi  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  inferior ao medido pela estação fluviométrica. Isto pode ser justificado pelo fato de eventos extremos, como este, serem mais difíceis de simular com exatidão. Aliado a este fato está a ausência da simulação do escoamento em redes de microdrenagem, com a água precipitada escoando pela superfície da bacia hidrográfica, que apresenta maior rugosidade e mais barreiras ao escoamento, fazendo com que o volume precipitado demore mais para chegar na seção transversal analisada. Dentre todos eventos simulados, este foi o único capaz de superar a altura máxima do canal (4,30 m), ocasionando episódio de inundação nas áreas de várzea do rio Belém.

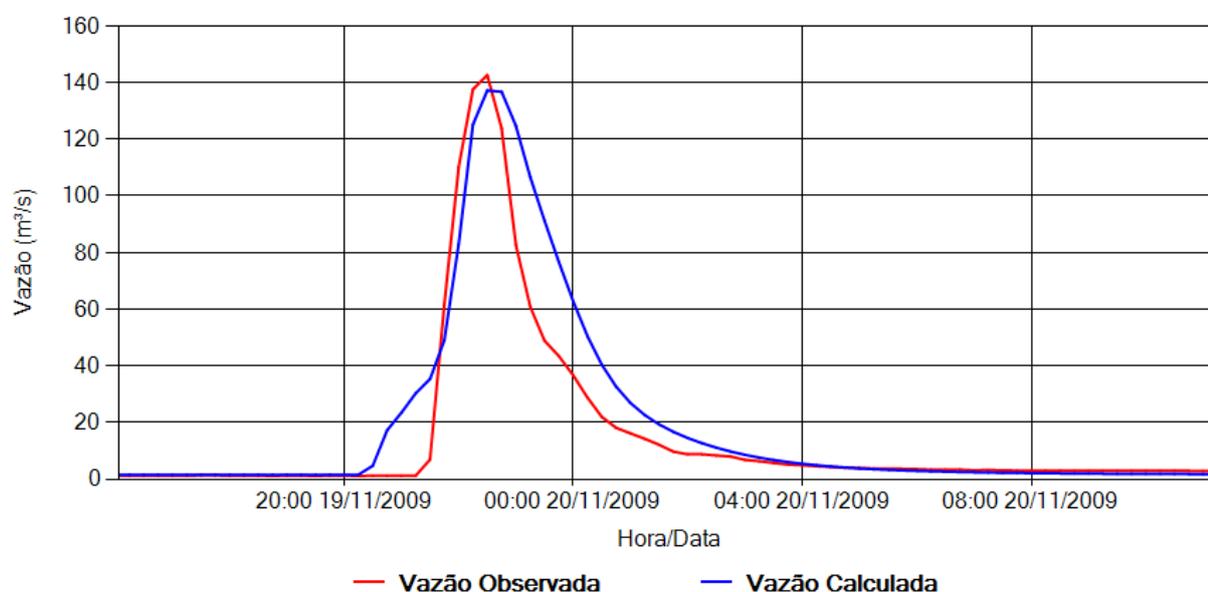


Figura 2 – Hidrogramas com vazões observada e calculada para evento do dia 19/11/2009

A simulação do evento de chuva ocorrido em 28/01/2010 (Figura 3) apresentou valor de  $\eta = 0,88$ . Assim como no evento anterior, é possível atribuir as diferenças entre os picos observados e calculados à ausência dos componentes de microdrenagem no modelo numérico. A vazão máxima calculada neste evento foi  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  inferior ao medido pela estação fluviométrica, enquanto a forma do

hidrograma modelado foi mais suave em comparação com o hidrograma observado, com uma recessão mais lenta, demonstrando que o volume de água que passou pela seção foi semelhante, porém escoou mais lentamente devido à rugosidade da bacia e barreiras topográficas.

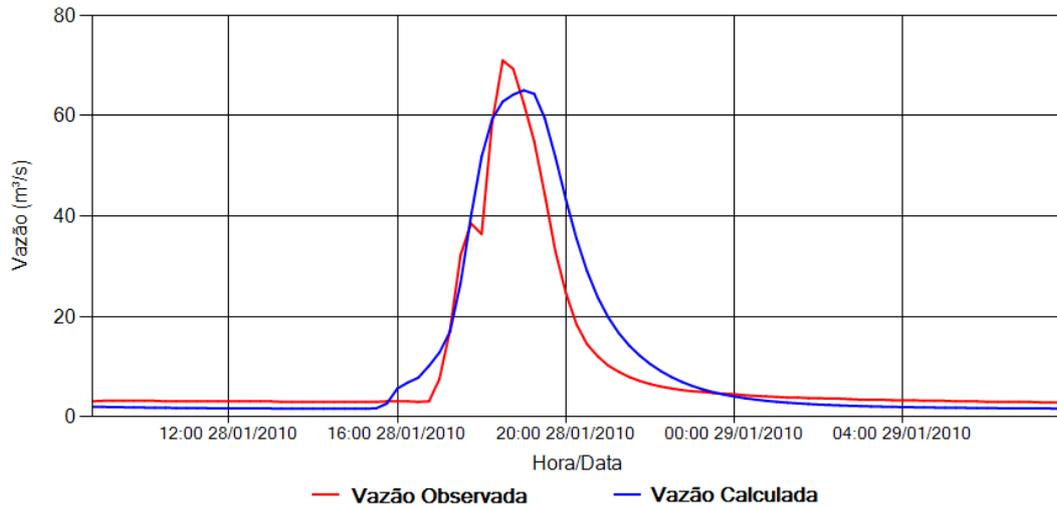


Figura 3 – Hidrogramas com vazões observada e calculada para evento do dia 28/01/2010

O evento com menores valores de precipitação e vazão foi quem apresentou a melhor eficiência ( $\eta = 0,96$ ). Nas simulações do dia 02/04/2011 (Figura 4) a correlação entre vazões observada e calculada foi quase exata. O pico de vazão foi igual nos dois hidrogramas –  $62 \text{ m}^3/\text{s}$  – havendo somente pequenas diferenças na ascensão e recessão. O início do escoamento superficial foi mais rápido no hidrograma observado, entretanto, a ascensão foi mais aguda na simulação. Já a recessão foi mais rápida no hidrograma observado na estação fluviográfica.

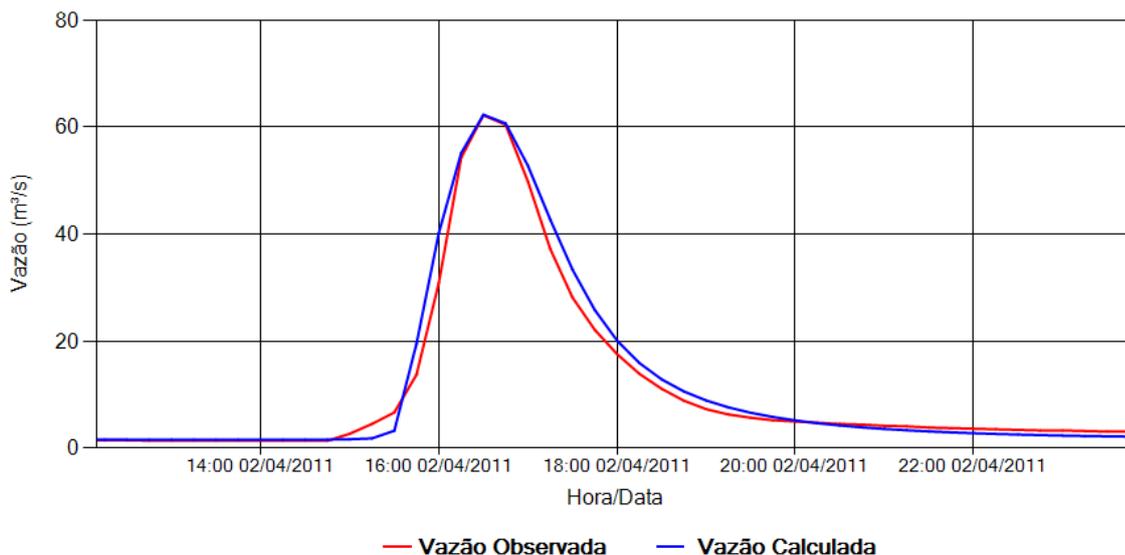


Figura 4 – Hidrogramas com vazões observada e calculada para evento do dia 02/04/2011

O evento do dia 20/12/2012 (Figura 5) apresentou coeficiente de eficiência  $\eta = 0,90$ . Neste evento, os valores de vazões máxima observada e calculada ficaram muito próximos – diferença de

2 m<sup>3</sup>/s – entretanto, o tempo necessário para se atingir o pico de vazão foi menor no hidrograma calculado, devido ao adiantamento do início do escoamento superficial em relação ao medido pela estação fluviométrica. Por outro lado, a recessão do hidrograma calculado foi mais lenta do que o observado. Entretanto, o volume de água que passou pela seção transversal foi semelhante, demonstrando a confiabilidade dos dados de estimativa de chuva e parâmetros de infiltração do modelo.

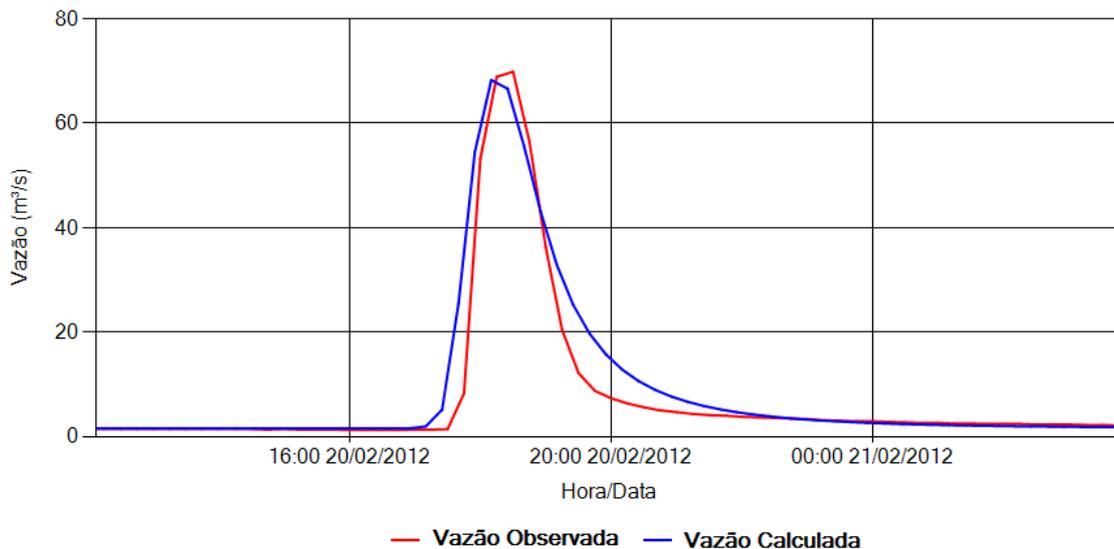


Figura 5 – Hidrogramas com vazões observada e calculada para evento do dia 21/02/2012

## CONCLUSÕES

O uso de dados de estimativa de chuva integrados – radar, satélite e pluviômetros – se mostrou de grande importância para a calibração do modelo numérico para uma bacia hidrográfica de grande extensão e que conta com apenas uma estação pluviográfica em funcionamento.

Através da escolha de quatro eventos de chuva convectiva com vazões consideradas críticas para a seção transversal analisada, foi possível verificar uma eficiência considerada boa pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe. Todos os eventos apresentaram valores de  $\eta$  superiores a 0,8, demonstrando a eficiência do modelo implementado para atuar na previsão de vazões futuras.

Como complemento a este trabalho, o modelo implementado será utilizado para simulação de eventos de chuva com diferentes tempos de recorrência ( $Tr = 10, 25, 50$  e  $100$  anos), de modo a verificar o impacto de cada chuva na formação de inundações na bacia hidrográfica, tornando possível o mapeamento de linhas de inundação nas áreas de várzea do rio Belém e principais afluentes.

Para estudos futuros, será possível utilizar os resultados deste modelo como condições de contorno para a discretização da bacia em sub-bacias menores, contemplando o mapeamento de redes de microdrenagem em modelos como o SWMM, tornando possível a simulação de alagamentos pontuais resultantes de chuvas que superam a capacidade de drenagem das galerias de águas pluviais, situação recorrente em áreas altamente impermeabilizadas e com alta densidade populacional.

Como resultado final, pretende-se implementar o presente modelo de forma operacional, atuando como um sistema de previsão de vazões na bacia hidrográfica do rio Belém, tornando possível a antecipação de possíveis eventos que gerem inundações significativas na bacia, podendo ser utilizado para a mitigação dos impactos ocasionados por estes eventos.

## REFERÊNCIAS

- CALVETTI, L.; BENETI, C.; NEUNDORF, L. A.; INOUE, R. T.; SANTOS, T. N.; GOMES, A. M.; HERDIES, D. L.; GONÇALVES, L. G. (2016) Quantitative precipitation estimation integrated by Poisson's equation using radar mosaic, satellite, and rain gauge network. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 22, n. 5
- COBRAPE. (2012) *Plano Diretor de Drenagem - Etapa macrodrenagem nas bacias Atuba, Belém, Barigui, Iguaçu, Padilhas e Passaúna, inseridas no município de Curitiba*. SMOP Curitiba - PR, Relatório técnico.
- FENDRICH, R. (1998) Aplicação de Modelo Hidráulico à Bacia do Rio Belém, em Curitiba: Previsão de Cotas de Enchentes e Avaliação de Áreas Inundáveis. In: *Drenagem Urbana – Gerenciamento, Simulação e Controle* Org. por Braga, B.; Tucci, C.; Tozzi, M. Editora da Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre - RS pp. 129-138.
- FENDRICH, R. (2002) *Coleta, armazenamento, utilização e infiltração das águas pluviais na drenagem urbana*. PPGEOL/UFPR Curitiba - PR, 499p.
- FGV. (1998) *Plano Nacional de Recursos Hídricos*. Fundação Getúlio Vargas, Secretaria de Recursos Hídricos, MMA Brasília - DF, Relatório Técnico.
- IPPUC – INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (2008). *Curitiba em dados – 2008*. IPPUC Curitiba - PR, CD-ROM.
- LOHMANN, M. (2011) *Regressão logística e redes neurais aplicadas à previsão probabilística de alagamentos no município de Curitiba, PR*. PPGEOL/UFPR Curitiba - PR, 231 p.
- LOPES, F. B.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G. (2014) Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, pp. S13-S19.
- MOREIRA, I. A. (2005) *Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros*. PPGERHA/UFPR Curitiba – PR, 96 p.
- 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.
- SUDERHSA. (2000) *Sistema de informações geográficas para gestão de recursos hídricos no Alto Iguaçu*. SEMA/PR Curitiba - PR. Relatório Final.
- SUDERHSA. (2007) *Plano da Bacia do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira*. SEMA/PR Curitiba - PR. Relatório de Diagnóstico.