

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE O HIDROGRAMA UNITÁRIO CONCEITUAL E OS MODELO DE NASH E GEOMORFOLÓGICO-NASH PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAPOCU – JARAGUA DOS SUL (SC)

Robison Negri¹ ; Heinz Dieter Oskar August Fill² & Bruno Henrique Toná Juliani³

Palavras-Chave – Hidrograma Unitário; Escoamento Superficial Direto

RESUMO

As ferramentas de planejamento e previsão de eventos extremos têm se mostrado cada vez mais importantes para os órgãos gestores e para a defesa da população. Especificamente com relação a eventos hidrológicos extremos, existem diversos modelos para prever o comportamento dos sistemas hídricos, sendo os modelos chuva-vazão uma alternativa interessante para a estimação do escoamento superficial direto. Um modelo clássico para tanto foi inicialmente apresentado por Sherman (1932), o hidrograma unitário, que apesar de sua simplicidade tem produzido bons resultados. O presente trabalho teve por finalidade estudar o hidrograma unitário de uma seção da bacia do rio Itapocu, localizada dentro da área urbana do município de Jaraguá do Sul - SC. Foram modelados os hidrogramas unitário médio observado, instantâneo de Nash e geomorfológico de Nash, baseados nos dados de medição de vazão observados. Os resultados foram bem congruentes, com coeficientes de ajuste R^2 maiores que 0,84 para todas as metodologias. Cabe destacar a versatilidade do modelo do hidrograma unitário geomorfológico de Nash, proposto por Rosso (1984), principalmente com ferramenta para análise de bacias desprovidas de dados de medição de vazão.

INTRODUÇÃO

A previsão do comportamento do escoamento superficial em bacias hidrográficas desempenha papel fundamental na gestão dos conflitos relacionados a ocupação dessas bacias, sendo assim, de grande relevância para os municípios, subsidiando seu planejamento e viabilizando a implantação de medidas de controle estruturais e não estruturais.

Conforme Andrade (2007) a tomada de decisão frente a necessidade de implementação de medidas sobre a unidade física da bacia hidrográfica, exige o conhecimento da magnitude das vazões na seção de estudo, sendo esta tarefa difícil nas bacias que não possuem monitoramento ou o possuem em períodos muito curtos.

Devido a tal dificuldade de obtenção da vazão de escoamento superficial, é comum a utilização de modelos para a transformação de chuva em vazão, mais precisamente chuva efetiva em vazão de

¹) UFPR - PPGERHA: Rua Guilhermina H. de Oliveira, 09 – Joinville – SC, (47) 3034-6231, robisonnegri@gmail.com

²) UFPR - PPGERHA: Rua N. S. da Luz, 945 – Curitiba -PR, (41) 3256-0689, heinzfill@yahoo.com

³) UFPR - PPGERHA: Rua Nilo Cairo, 68 - Curitiba - PR, (44) 997042234, brunotjuliani@gmail.com

escoamento superficial. Um dos métodos consagrados para tal finalidade é o método do Hidrograma Unitário, proposto por Sherman (1932).

De acordo com Carvalho e Chaudrhy (2001) o método do Hidrograma Unitário é baseado na suposição de que a bacia hidrográfica é um sistema linear invariante no tempo. Quando este sistema é excitado por um pulso unitário instantâneo, a resposta da bacia hidrográfica em relação esta chuva em forma de impulso unitário é chamada de Hidrograma Unitário Instantâneo - HUI.

Ainda conforme Carvalho e Chaudrhy (2001), dentre as técnicas baseadas na teoria do Hidrograma Unitário (HU), merecem importância as formulações geomorfológicas, pois possibilitam a previsão do escoamento superficial da bacia, para esse pulso unitário, ajustando sua resposta através de variáveis geomorfológicas locais.

Neste sentido o conceito do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG) foi introduzido por Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979), e a importância deste conceito reside na possibilidade de ajustar o comportamento hidrológico da bacia a sua geomorfologia, através do uso das leis de Horton (1945). Depois da introdução do conceito do HUIG em 1979, inúmeros autores propuseram melhorias e adaptações, sendo que Rosso (1984) desenvolveu um estudo acoplado as leis de Horton para o Modelo de Nash (1957), permitindo assim o ajuste dos parâmetros de escala e forma do HUI, às características geomorfológicas da bacia hidrográfica.

O presente trabalho pretende desenvolver um estudo comparativo entre os resultados obtidos para a reprodução do HU de Sherman (1932) de uma seção da bacia hidrográfica do Rio Itapocu, no município de Jaraguá do Sul - SC, utilizando o Modelo originalmente apresentado por Nash (1957) e a versão geomorfológicas de Nash (Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash), proposto por Rosso (1984), derivado das leis de Horton (1945).

MATERIAIS E MÉTODOS

BACIA HIDROGRÁFICA DE ESTUDO

A subacia objeto deste estudo pertence a bacia hidrográfica do rio Itapocu, sendo sua seção localizada nas coordenadas 26° 28' 48" e 49° 4' 51" no sistema WGS84, junto a ponte Abdon Batista, Jaraguá do Sul-SC. Possuindo registros de precipitação e nível do rio com telemetria, sendo cadastrada na ANA sob o código 82350000 (Período de 2014 a 2016, em que a estação foi automatizada), no sistema de informações hidrológicas – Hidroweb, conforme ilustra a Figura 1.

A bacia do estudo está localizada na região da baixada norte catarinense, alinhando-se ao sul com a bacia do Rio Itajaí e ao norte com a bacia do Rio Cubatão, compondo estas três a vertente oceânica da Serra do Mar. Os rios da região são caracterizados por declives acentuados, sendo classificados com relação a seu uso nas classes 1 e 2, segundo Portaria Estadual nº 024/79. As águas são principalmente para uso agrícola, com a região apresentando lavouras de arroz. Também se destaca o uso da água para a piscicultura (SIRHESC, 2018).

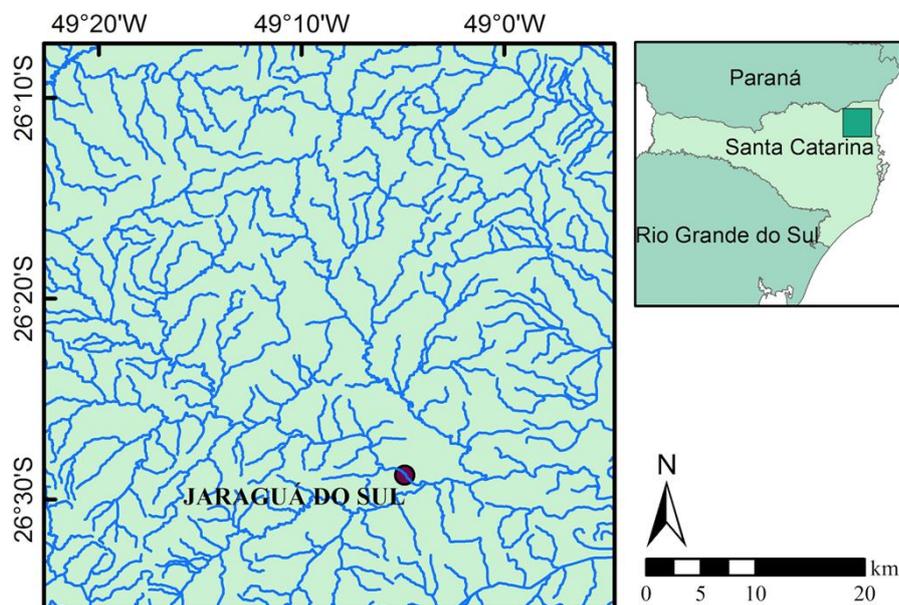
OBTENÇÃO DOS DADOS

A curva chave para estação fluviométrica de Jaraguá do Sul - SC foi reajustada por SOUZA (2013), com base nos dados cedidos pela EPAGRI/CIRAM conforme a equação (1):

$$Q = 22,017.h^{2,7822} \quad (1)$$

Sendo: Q - é a vazão da seção do rio, em metros cúbicos por segundos; h - representa o nível do rio, em metros lineares.

Figura 1 – Área de estudo.



OBTENÇÃO DOS HIDROGRAMAS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO

Com base nos dados obtidos foram eleitos 5 eventos de precipitação, conforme Tabela 01, privilegiando hietogramas menos complexos, com registro de vazão em intervalos de 1 hora.

Tabela 01 - Eventos escolhidos.

Identificação	Período	Precipitação últimos 3 dias (mm)	Precipitação média total (mm)	Precipitação efetiva (mm)	Escoamento Superficial Direto (m ³)	Coef. C
Evento 01	16/03/2015 a 17/03/2015	7,6	11,0	0,7	843136	0,056
Evento 02	05/02/2016 a 06/02/2016	7,8	41,0	1,3	887694	0,024
Evento 03	19/03/2016 a 20/03/2016	0	31,0	1,3	925000	0,043
Evento 04	23/02/2016 a 24/02/2016	29,4	27,0	1,5	852644	0,052
Evento 05	22/05/2016 a 23/05/2016	17,6	58,0	3,6	663288	0,105

A separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo seguiu a metodologia apresentada por Tucci (1993), que propõe uma variação linear para o escoamento subterrâneo durante a ocorrência do escoamento superficial direto na seção de estudo. A definição dos dois pontos notáveis de início e fim do escoamento superficial direto foi realizada através da análise do comportamento das variações das vazões dos hidrogramas observados, sendo o primeiro ponto notável correspondente ao tempo em que se tem início o aumento das vazões no hidrograma e o segundo ponto notável

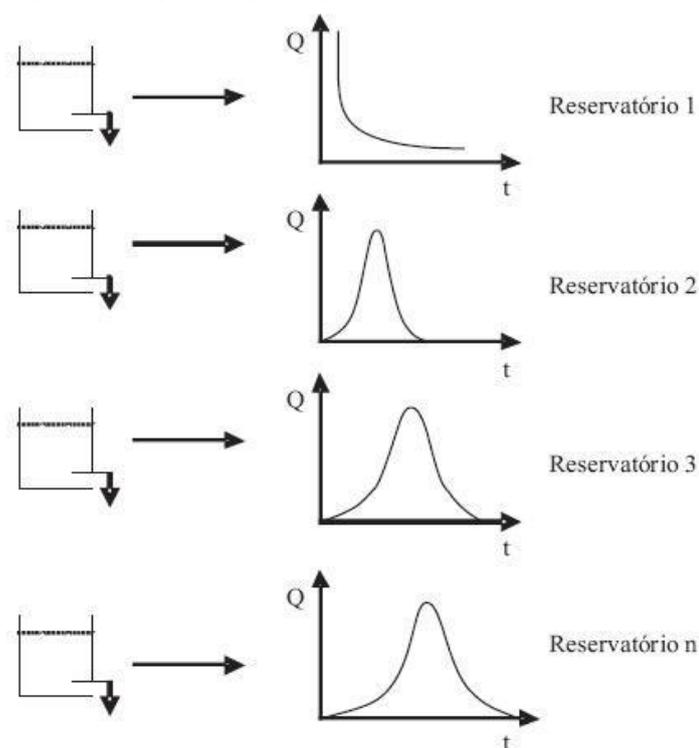
correspondendo ao ponto de inflexão da curva de recessão do hidrograma, para uma tendência exponencial.

Com base nos hidrogramas de Escoamento Superficial Diretos separados foi possível, calcular o volume de escoamento superficial, precipitação efetiva e, conseqüentemente, o Hidrograma Unitário proposto por Sherman (1932).

MODELO DE NASH

Nash (1957), propôs um método para representar o escoamento direto de uma bacia hidrográfica, através de uma sequência de reservatórios lineares, permitindo uma representação adequada para o HU, usando dois parâmetros característicos, ou seja, o número de reservatórios e a constante k , relacionando a vazão defluente com o volume de cada reservatório. Nash considerou o escalonamento do escoamento superficial através de “ n ” reservatórios lineares em série, mantendo a constante “ k ” de cada reservatório fixa, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática do Modelo de Nash.



Fonte: SILVA et al. (2008)

Conforme Silva et al. (2008) a integração defasada em um intervalo de tempo t , de dois reservatórios lineares diferentes, em série, com constantes k_1 e k_2 , representa o Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI), cuja equação geral é:

$$u(0, t) = \int_0^t \frac{1}{k_1} e^{-\frac{\tau}{k_1}} * \frac{1}{k_2} e^{-(t-\tau)/k_2} d\tau \quad (2)$$

Resolvendo-se a integração, para “ n ” reservatório iguais ($k_1 = k_2 = k$), obtém-se a equação genérica que representa o Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI) do modelo de Nash (1957), cuja forma é:

$$u(0, t) = \left(\frac{1}{k}\right)^{n-1} \cdot \frac{e^{-t/k}}{k \cdot \Gamma(n)} \quad (3)$$

Para determinação das ordenadas do HU em função de t , procedeu-se a convolução do HUI, em software Excel, considerando uma precipitação unitária de 1 mm com duração unitária de 1 hora, dando representado pela integral a seguir, que é resolvida numericamente:

$$h(t) = \int_0^1 \frac{1}{k} \left(\frac{t-\tau}{k}\right)^{n-1} \cdot \frac{e^{-(t-\tau)/k}}{\Gamma(n)} d\tau \quad (4)$$

MODELO GEOMORFOLÓGICO DE NASH

Rosso (1984) apresenta uma metodologia que simplifica significativamente a aplicação do modelo Geomorfológico proposto por Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979). De maneira geral, sua proposta consistiu em relacionar os dois parâmetros do modelo de Nash (1957), com as características geomorfológicas da bacia representadas pelas Leis de Horton (1945), permitindo assim a estimação dos parâmetros através das características geomorfológicas da bacia hidrográfica. Rosso (1984) propôs as seguintes expressões para os parâmetros n e k do Modelo de Nash:

$$n = 3,29 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,78} \cdot R_L^{0,07} \quad (5)$$

$$k = 0,7 \cdot \left(\frac{R_A}{R_B R_L}\right)^{0,48} \cdot \frac{L_\Omega}{v} \quad (6)$$

Sendo L_Ω - o comprimento do canal de maior ordem (m); v - a velocidade média do escoamento direto (m/h)

As variáveis R_A , R_B e R_L , são as relações das Leis de Horton (1945), sendo respectivamente relação entre as áreas médias das sub-bacias dos canais, relação de bifurcação e relação entre o comprimento médio dos canais. Tais relações são calculadas em função da ordem hierárquica dos cursos d'água da bacia, conforme Strahler (1957):

$$R_A = \frac{A_w}{A_{w-1}} \quad (7)$$

$$R_B = \frac{N_w}{N_{w+1}} \quad (8)$$

$$R_L = \frac{L_w}{L_{w-1}} \quad (9)$$

Onde A_w - representa a área média das bacias de ordem w ; N_w - representa o número de canais de ordem w e L_w - representa o comprimento médio dos canais de ordem w .

Para a determinação das relações propostas por Horton (1945), utiliza-se algoritmo TauDem associado ao software ArcGis, como proposto por Pádua (2015). Para isso, inicialmente deve-se importar um modelo digital de elevação do terreno (MDE), disponibilizado pelo INPE. Com o MDE, é então traçada a delimitação da bacia a partir de um ponto de exutória, bem como o traçado dos canais.

A estimativa dos parâmetros k e n , para o modelo de Nash e para o modelo Geomorfológico de Nash, foi realizada através de um processo de otimização numérica (calibração) com o objetivo obter o maior coeficiente de correlação para o ajuste. No ajuste do modelo de Nash foram calibrados os dois parâmetros n e k , de forma a otimizá-los. Já para o modelo Geomorfológico de Nash, foi

calibrado somente o parâmetro cinemático (velocidade média), sendo n e k , obtidos pelo método de Rosso (1984).

RESULTADOS

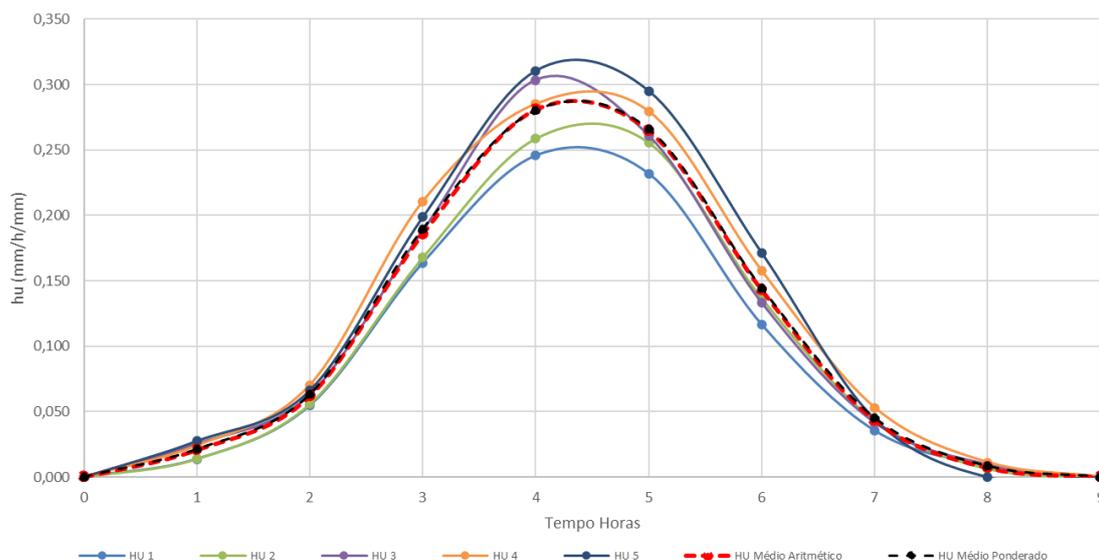
HIDROGRAMAS UNITÁRIOS OBSERVADOS

De posse dos hidrogramas de escoamento superficial direto e da precipitação efetiva de cada evento, foram então traçados os hidrogramas unitários observados, bem como dois hidrogramas médios, obtidos pela aritmética e ponderada dos hidrogramas unitários observados, como demonstrado na Tabela 02 e nas Figuras 3 e 4. É válido ressaltar que a média ponderada foi calculada em função do coeficiente de escoamento superficial (C) de cada evento.

Tabela 02 – Cálculo do hidrograma unitário observados médio

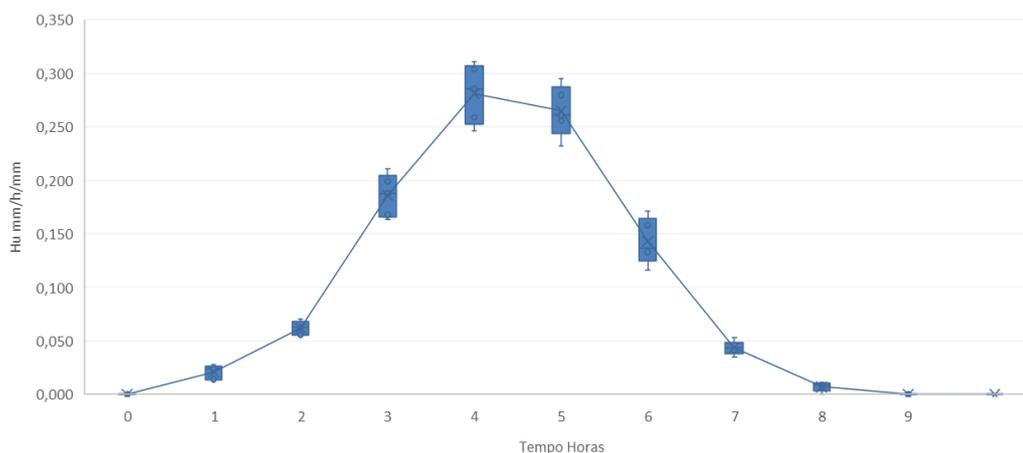
Tempo	HU 1	HU 2	HU 3	HU 4	HU 5	Média	Des. Padrão	Média Ponderada em função do C
h	mm/h/mm							
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,014	0,014	0,025	0,024	0,028	0,021	0,007	0,021
2	0,055	0,056	0,063	0,070	0,066	0,062	0,007	0,063
3	0,164	0,168	0,188	0,211	0,199	0,186	0,020	0,190
4	0,246	0,259	0,303	0,285	0,311	0,281	0,028	0,280
5	0,232	0,256	0,261	0,280	0,295	0,265	0,024	0,266
6	0,116	0,137	0,133	0,158	0,171	0,143	0,022	0,144
7	0,035	0,043	0,041	0,053	0,044	0,043	0,006	0,045
8	0,009	0,006	0,009	0,011	0,000	0,007	0,004	0,008
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Figura 3 – Hidrogramas unitários para os 5 eventos estudados e médios



Na Figura 3, apresenta-se a comparação entre as ordenadas dos hidrogramas unitários obtidos para os cinco eventos estudados, com os hidrogramas unitários médios, aritmeticamente calculado e ponderadamente calculado (ordenadas do HU observados) em relação aos seus respectivos coeficientes de escoamento superficiais diretos. Pode-se verificar que o hidrograma médio representa bem os demais hidrogramas empíricos, sendo o $R^2 = 0,91$. Já na Figura 4, pode ser observada a dispersão da ordenadas em relação a cada período do hidrograma unitário, sendo maior na parte ascendente do hidrograma.

Figura 4 – Hidrograma unitário empírico médio



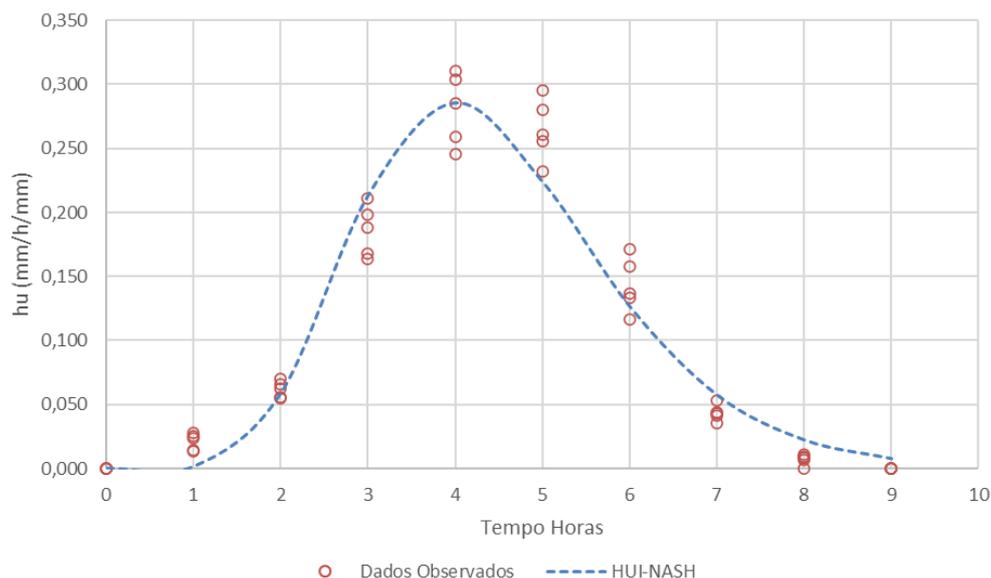
HIDROGRAMA UNITÁRIO DE NASH AJUSTADO

Aplicada a metodologia tradicional do modelo de Nash, foram obtidos os seguintes coeficientes de calibração do modelo:

$$n = 7,37 \text{ e } k = 0,53 \text{ h}$$

De posse dos coeficientes, pôde-se traçar o hidrograma unitário de Nash, aplicando a equação (4). A Figura 5 mostra o hidrograma unitário de Nash comparando com a ordenadas do HU observado.

Figura 5 – Hidrograma Unitário do Modelo Nash

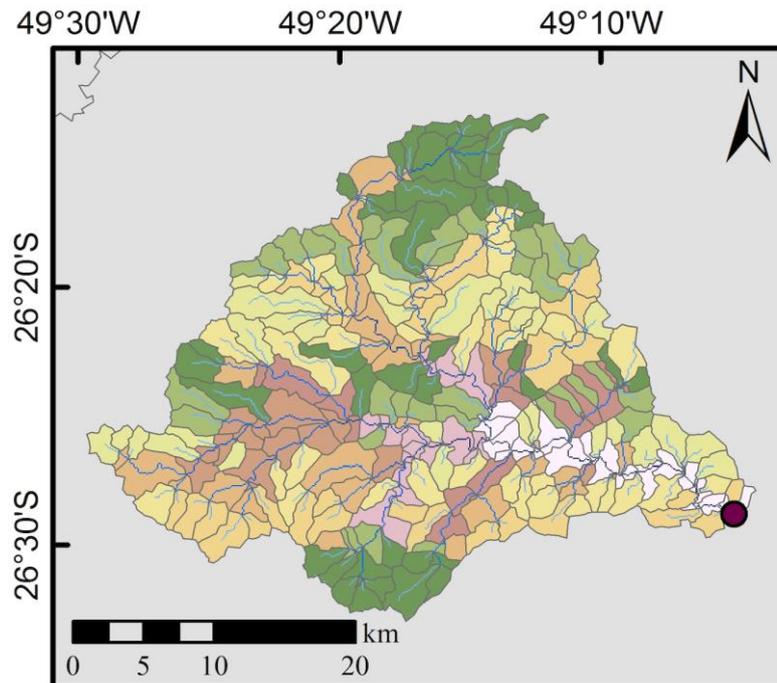


Para o hidrograma unitário de Nash, o coeficiente de determinação (R^2) com relação aos eventos observados foi de 0,85, sendo este um excelente ajuste.

HIDROGRAMA UNITÁRIO GEOMORFOLÓGICO AJUSTADO

Aplicado o modelo digital de elevação da área de estudo no software ArcGis, foram delimitados os canais de descarga e o traçado da bacia, como observado na Figura 6.

Figura 6 – Drenagem da estação Jaraguá do Sul



Pelo traçado observado, no trecho do exutório, o rio é classificado como de 5ª ordem, com a bacia delimitada em microrregiões de drenagem. A área da bacia até o exutório foi de 762 km², tendo o canal de 5ª ordem uma extensão de 27,5 km.

Foram também calculadas as relações de Horton, e por elas, foram dados os seguintes coeficientes geomorfológicos para o modelo de Nash. As relações de Horton encontradas foram $R_A = 1,5$; $R_B = 4,1$; $R_L = 1,9$. Tais valores estão próximos aos esperados, segundo Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979), que sugere valores entre 3 e 6, entre 3 e 5, e entre 1,5 e 3,5 respectivamente.

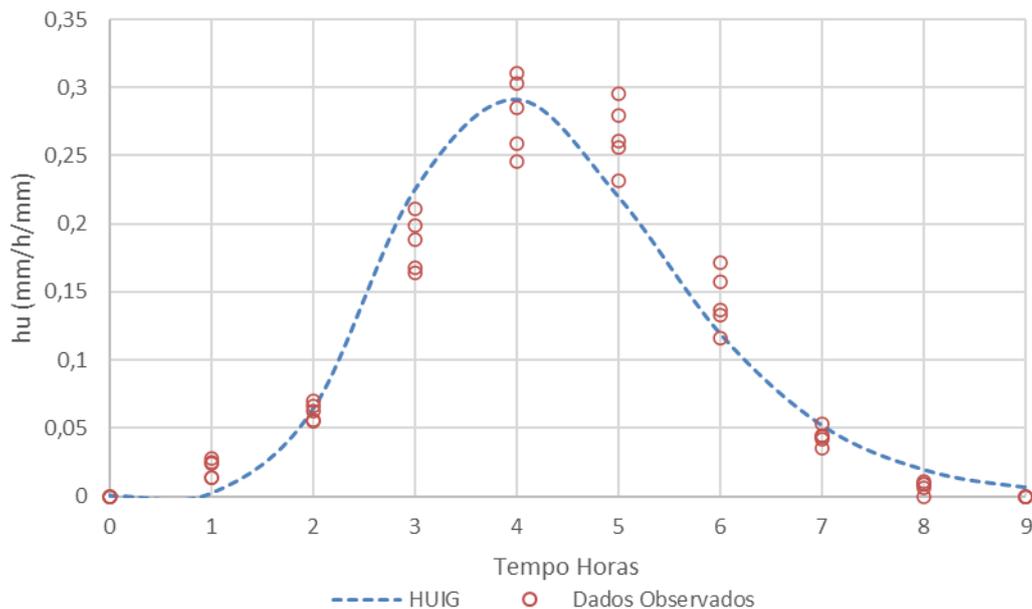
A velocidade média, foi ajustada numericamente até a obtenção do maior coeficiente de correção entre o modelo calibrado e os dados observados, sendo obtida a estimativa de 4,71 m/s.

Desta forma, foram calculados os coeficientes Geomorfológicos de Nash como segue.

$$n = 7,54 \text{ e } k = 0,51 \text{ h}$$

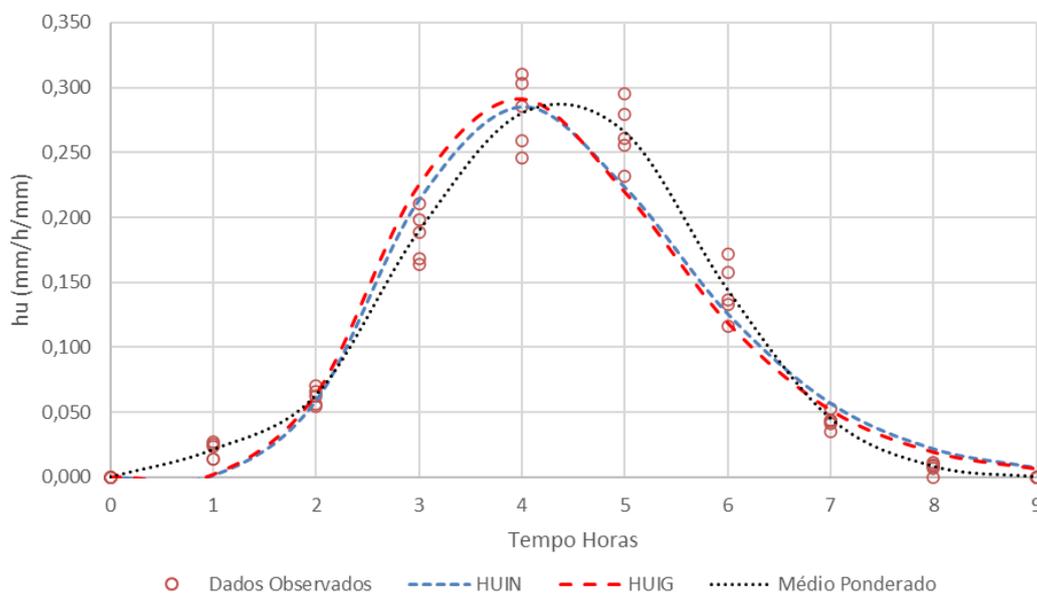
O hidrograma unitário geomorfológico traçado pode ser observado na Figura 7, o coeficiente de determinação (R^2) com relação aos eventos observados foi de 0,87, sendo este também um bom ajuste.

Figura 7 – Hidrograma unitário geomorfológico de Nash



Como observado na Figura 8, o hidrograma unitário geomorfológico não se diferencia de maneira significativa do hidrograma unitário médio observado e do Modelo de Nash

Figura 8 – Hidrograma unitário geomorfológico de Nash



CONCLUSÃO

Os modelos de previsão de escoamento direto mostram-se como ferramentas importantes para a gestão e planejamento dos recursos hídricos. Em se tratando de eventos de máximos o hidrograma unitário, mesmo com suas limitações metodológicas e conceituais, é uma potente ferramenta, principalmente para bacias com área menor que 1000 km².

A bacia do rio Itapocu, devido suas dimensões, geomorfologia e ocupação antrópica, representa grande interesse público e privado, sendo sua população acometida frequentemente com eventos hidrológicos extremos que impactam na qualidade de vida e econômica locais.

Os hidrogramas unitários propostos vem auxiliar neste sentido, com o objetivo de possibilitar previsões aos eventos extremos, além de serem úteis no planejamento de médio e longo prazo nos planos diretores setoriais, principalmente do município de Jaraguá do Sul.

Verificou-se alta congruência entre os modelos de Nash, hidrograma unitário observado e o modelo geomorfológico, sendo somente importante ressaltar a correta estimação da velocidade média do escoamento superficial direto, que neste estudo foi obtida dos dados observados. Os resultados obtidos se mostraram bem satisfatórios, com baixos grau de incerteza.

Outro fator importante é que se pode verificar o grande potencial do Hidrograma Instantâneo Geomorfológico ou Hidrograma Geomorfológico de Nash, principalmente em bacias desprovidas de dados de medição de vazões, desde que se utilize uma metodologia adequada para a estimação da velocidade média, necessária para calibração do modelo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. C. DE S. (2007). Determinação de hidrogramas unitários instantâneo geomorfológico - bacia do ribeirão salobra. Dissertação Mestrado. UFMT. 123 p.
- CARVALHO, M. A. de; CHAUDRHY, F. H. (2001). Aplicação de Hidrograma Unitário Geomorfológico na Previsão de Respostas Hidrológicas. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 6. N.4. p. 5-17. Out/Dez.
- HORTON, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bull Geol. Soc. Am. vol. 56, p. 275-370.
- NASH, J. E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph, IASH publication no.45, vol. 3-4, pp. 114-121.
- PÁDUA, L. H. R. de (2015). Regionalização de hidrogramas unitários em bacias não monitoradas do estado de minas gerais. Dissertação Mestrado. Belo Horizonte Escola de Engenharia da UFMG. p. 174.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I. e VALDÉS, J. B. (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. Water Resour. Res. vol. 15, n°6, p. 1409-1420. Dec.
- ROSSO, R. (1984). Nash Model Relation to Horton Order Ratios, Water Resour. Res., 20(7), 914 – 920, doi:10.1029/WR020i007p00914.
- SHERMAN, L. K. (1932). Streamflow from rainfall by unit-graph method. Engineering News-Record vol. 108, p. 501-505. April 7.
- SIDUOSKI, C.R. e NEGRI, R. (2015). Determinação de hidrograma unitário – seção da ponte abdon batista, situada no município de Jaraguá do Sul – SC. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário – Católica De Santa Catarina. Jaraguá do Sul – SC.
- SILVA, P. M. DE O.; MELLO, C. R. DE; SILVA, A. M. DA; COELHO, G. (2008). Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. vol.12 no.3 Campina Grande – MG.
- SIRHESC. (2018). Comitê de Gerenciamento Bacia Hidrográfica do Rio Itapocu. Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos do Estado de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.aguas.sc.gov.br/o-comite-rio-itapocu/historia-rio-itapocu>. Acesso em dez/2018.
- SOUZA, J. I. (2013). Análise do comportamento espaço temporal de cargas poluentes na bacia hidrográfica do rio Itapocú. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI, Itajaí. p. 93.
- STRAHLER, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. New Halen: Transactions: American Geophysical Union, 1957.v.38. p. 913-920.
- TUCCI, C. E. M. (1993). Hidrologia: Ciência e aplicação. EDUSP, Editora da UFRGS.