

Regionalização com geometria hidráulica e fractal: estudo de caso com hidrograma unitário instantâneo geomorfológico

Regionalization with hydraulic geometry and fractal: case study with geomorphologic instantaneous unit hydrograph

Marco Alésio Figueiredo Pereira, Gabriel Fernando Narváez Campo, Masato Kobiyama e Nilza Maria dos Reis Castro

Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

geocram@gmail.com; gabonar90@gmail.com; masato.kobiyama@ufrgs.br; nilza@iph.ufrgs.br

Recebido: 08/07/2015 - Revisado: 11/01/2015 - Aceito: 29/01/2016

RESUMO

O Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (GIUH) é gerado a partir de dois componentes, um em relação à geomorfologia da bacia hidrográfica e outro em relação às condições hidráulicas de movimento da gota d'água ao longo do canal. A partir desta constatação o objetivo deste trabalho é determinar a relação entre velocidade média no fluxo dos canais (v) e comprimento de canais para cada bacia, utilizando valores de velocidade medidos em campo e precipitação efetiva de sete eventos, distintos, gerando GIUH calibrados. Com os valores de velocidade calibrados para cada bacia, relacionou-se de forma linear e potencial, através de regressão multivariada, os parâmetros de Precipitação média anual (Pma), Geometria Hidráulica (GH) e Geometria Fractal (GF) e determinando uma equação regionalizada de v . Os GIUHs determinados a partir de Pma, GH e GF apresentaram bom desempenho quando comparados com os hidrogramas observados, comprovando que esta metodologia se adequa para representar e estimar vazões em locais com poucos dados e até mesmo sem dados.

Palavras Chave: GIUH. Precipitação média anual. Geometria hidráulica. Geometria Fractal.

ABSTRACT

The Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) is generated from two components, one in relation to the geomorphology of the watershed and the other in relation to the hydraulic conditions of drop water moment along the channel. From this observation, the objective of the present study is to determine relationship between water flow velocity and length of channels for each basin, using velocity values measured in the field, and effective rainfall of seven distinct events, it was generated calibrated GIUH. With the v values for each basin were related linearly and potential, multivariate regression, the annual rainfall (Pma) parameters, Hydraulic Geometry (HG) and Fractal Geometry (FG) determining a regionalized equation v . The GIUHs determined from Pma, GH and GF performed well when compared to the observed hydrograph, which proves that this methodology is suitable to represent and estimate flows.

Keywords: GIUH. Average Annual Rainfall. Hydraulic Geometry. Fractal Geometry.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das características hidrológicas de uma bacia hidrográfica é a premissa para a conservação dos recursos naturais e para aplicação de técnicas adequadas para o desenvolvimento sustentável. O monitoramento de variáveis físicas (precipitação, evaporação, infiltração, escoamento superficial, cotas e vazões) é uma das formas de se determinar tal conhecimento.

Além do monitoramento, outra forma de se determinar as particularidades de uma bacia hidrográfica é conhecer o comportamento de uma variável no decorrer do tempo e do espaço e suas transformações e agregações de fenômenos. Por consequência, pode-se prever o comportamento da variável em estudo e os seus efeitos em um escala espaço-temporal. Entre os fenômenos ocorrentes, cita-se a transformação de precipitação (P) em vazão (Q). Esta transformação é um dos mais complexos fenômenos envolvidos em uma bacia hidrográfica, em virtude de diversas variáveis determinantes, como por exemplo, tipo de solo, uso e ocupação do solo, umidade do solo, declividade dos canais, forma da bacia, entre outros. Outro fator limitante no conhecimento de tais processos é a magnitude espacial das bacias hidrográficas, consequentemente, dificultando e até mesmo impossibilitando o monitoramento contínuo em todos os locais de interesse.

Com o objetivo de sanar tais lacunas Sherman (1932) propôs uma metodologia para estimar a vazão em um canal no exutório de uma bacia hidrográfica, inserindo o princípio da teoria do Hidrograma Unitário (HU). O HU se baseia no princípio da precipitação efetiva ser distribuída uniformemente na bacia e dentro de um período de tempo específico; o HU é reflexo de um determinado período de precipitações e as características físicas da bacia (CHOW, 1964). A partir da teoria do HU Chow (1964) propôs uma nova forma para definir a resposta de P - Q em uma bacia, determinando que Q de resposta da bacia seria independente da duração da precipitação, mas referente a uma precipitação unitária instantânea, criando assim o conceito de Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI). Desde o HUI proposto por Chow (1964) foram determinados diversos modelos: modelos lineares em que uma entrada $Y_1(t)$ produz uma saída $X_1(t)$ e a entrada $Y_2(t)$ produz uma saída $X_2(t)$, seguindo a condição $Y_1(t) + Y_2(t)$ produz a saída $X_1(t) + X_2(t)$; modelos não lineares, os quais indicam que o escoamento tem um comportamento não linear. Podendo ser representados pela equação da continuidade $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$ $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$, indicando que Q é variável independente do escoamento, dependente de A (área), sendo A área da seção; q vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento do trecho; x intervalo do trecho e t intervalo de tempo.

Entre os diversos modelos existentes o presente trabalho aborda o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (*Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph - GIUH*), proposto por Rodríguez-Iturbe e Valdés (1979). Esta metodologia leva em consideração as clássicas leis geomorfológicas propostas por Horton (1945).

O processo P - Q é resultado de diversos e complexos processos existentes nas inter-relações dos componentes dos

sistemas hidrológicos de uma bacia hidrográfica, o que dificulta equacionar respostas fidedignas do fluxo resultante. Esse desafio se torna ainda mais complicado quando os dados disponíveis são limitados ou até mesmo quando não há dados monitorados. Cudennec et al. (2004) investigaram os aspectos geomorfológicos no conceito do HU e concluíram que os parâmetros geomorfológicos explicam o HU pela teoria do GIUH. Assim, o GIUH se demonstra uma ferramenta útil para estimar a vazão no exutório de uma bacia hidrográfica, pois leva em consideração as feições hidrogeomorfológicas da rede de drenagem da bacia.

Apesar da teoria do GIUH ser consolidada no meio científico o presente trabalho se diferencia por abordar uma nova forma de se determinar o parâmetro λ , que é produto da velocidade média (v) pelo comprimento médio dos canais de ordem (i); e regionalizar a variável v com a inserção de parâmetros da precipitação média anual (Pma), geometria hidráulica (GH) e geometria fractal (GF). Conforme relatado por Hrachowitz et al. (2014) a IAHS - *International Association of Hydrological Sciences*, determinou o PUB - *Predictions in Ungauged Basins*, que é uma iniciativa lançada com o objetivo de formular e implementar programas científicos voltados para o avanço na capacidade de fazer previsões em bacias não monitoradas. Nesse sentido, o presente trabalho almeja contribuir com o avanço da ciência hidrológica implementando um novo método de inferir vazões em locais com poucos dados ou até mesmo sem dados. Para tal, utilizar-se-á a Pma, GH e GF como parâmetros de entrada e utilizando como estudo de caso a bacia hidrográfica do rio Ijuí, Estado do Rio Grande do Sul.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Hidrograma unitário instantâneo geomorfológico

O GIUH foi proposto por Rodríguez-Iturbe e Valdés (1979) e subsequentemente generalizado por Gupta, Waymire e Wang (1980). Nesta teoria a resposta hidrológica de uma bacia é estudada pela decomposição do processo de formação do escoamento superficial dentro de distintas contribuições: (i) nos mecanismos de geração do escoamento superficial e tempo de transporte dentro das encostas; (ii) no processo que envolve a propagação da vazão, principalmente dentro dos canais individuais; (iii) na representação da estrutura geomorfológica da rede de drenagem. Portanto, a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica é baseada na relação entre a sua geomorfologia (área de captação, forma da bacia, topografia, declividade do canal, densidade de fluxo e armazenamento do canal) e sua hidrologia (AGIRRE et al., 2005; KHALEGHI; GHODUSI; AHMADI, 2014; NOURANI; SINGH; DELAFROUZ, 2009).

Rodríguez-Iturbe e Rinaldo (1997) comentaram que bacias hidrográficas geralmente seguem as leis geomorfológicas propostas por Horton (1945); sendo que o HUI da bacia pode ser interpretado como função densidade de probabilidade (PDF), a qual, segundo Gupta, Waymire e Wang (1980) é definida como função do tempo de viagem de uma gota, quando inserida no movimento newtoniano da rede de drenagem da bacia (ω). Assim, o princípio da teoria GIUH é derivar esta PDF com base

em parâmetros geomorfológicos. A fim de determinar o GIUH; o dado de entrada (precipitação) é considerado como gotas de chuva uniformes que são assumidas para serem distribuídas aleatoriamente ao longo da bacia hidrográfica e ao longo do tempo.

Hall, Zaki e Shalin (2001) relataram que a escala e a forma do GIUH dependem de suposições sobre: (a) probabilidade de que uma gota de chuva caia sobre uma área de drenagem pertencente a um fluxo da ordem (i); (b) probabilidade de transição da gota a partir do fluxo de ordem (i) para outro de ordem (j), $i < j$; e (c) PDF selecionada para descrever os tempos de retenção da gota para qualquer ordem de canal. Os itens (a) e (b) são independentes de escala e determinados apenas pela topologia da rede de drenagem, o que pode ser descrito em termos de Leis de Horton. Em contraste, os tempos de permanência, item c, são dependentes dos canais de drenagem e suas propriedades hidráulicas.

Para melhor entendimento e interpretação do processo de determinação e análise do GIUH a figura 1 demonstra de forma hipotética uma bacia de 3ª ordem, dividida em sub-bacias de acordo com a ordem de seus canais; também é apresentado o esquema de reservatórios lineares e paralelos. Aqui o HU de cada ordem é representado por convolução a partir dos fluxos de ordem (i) até ordem (j) definindo-se o GIUH (FRANCHINI; O'CONNELL, 1996). Cada reservatório λ representa a bacia de ordem (i) que recebe o aporte de todos os canais de ordem $< i$; γ representa a probabilidade que uma gota caia na bacia (i) e drene para um canal de ordem (i) e P_r representa a probabilidade de transição.

Khaleghi, Ghodusi e Ahmadi (2014) em estudo realizado em uma bacia (37,1 km²) localizada no noroeste do Irã, mostraram o bom desempenho do modelo GIUH na determinação de geração de hidrogramas. Os autores ainda concluíram que em virtude do método proposto ser de simples obtenção, este se apresenta com a melhor proposta para determinar vazões em bacias hidrográficas sem monitoramento. Kumar (2015) em estudo sobre GIUH na bacia hidrográfica de Ramganga (452 km²), parte central do Himalaia (Índia) concluiu que este modelo não necessita de dados históricos de P e Q , podendo ser efetivamente utilizados para prever o escoamento superficial em bacias montanhosas sem monitoramento, sendo útil para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. A mesma conclusão foi afirmada também por Bhaskar, Parida e Nayak (1997) que aplicaram o modelo na bacia do rio Jira (615 km²), localizada no leste da Índia.

Métodos que utilizam Leis de Horton (1945)

Rodríguez-Iturbe e Rinaldo (1997) afirmaram que bacias hidrográficas geralmente seguem as leis geomorfológicas propostas por Horton (1945). Seguindo este preceito os autores utilizaram as leis propostas por Horton (1945) como parâmetros de entrada do GIUH.

De acordo com Rosso, Bacchi e La Barbera (1991), as leis de Horton referem-se a Lei do Número de Canais, Lei do Comprimento de Canais e Lei da Área da Bacia, (Tabela 1). As relações espaciais de escalonamento geométrico são independentes da ordem ou resolução onde a rede esta sendo observada e

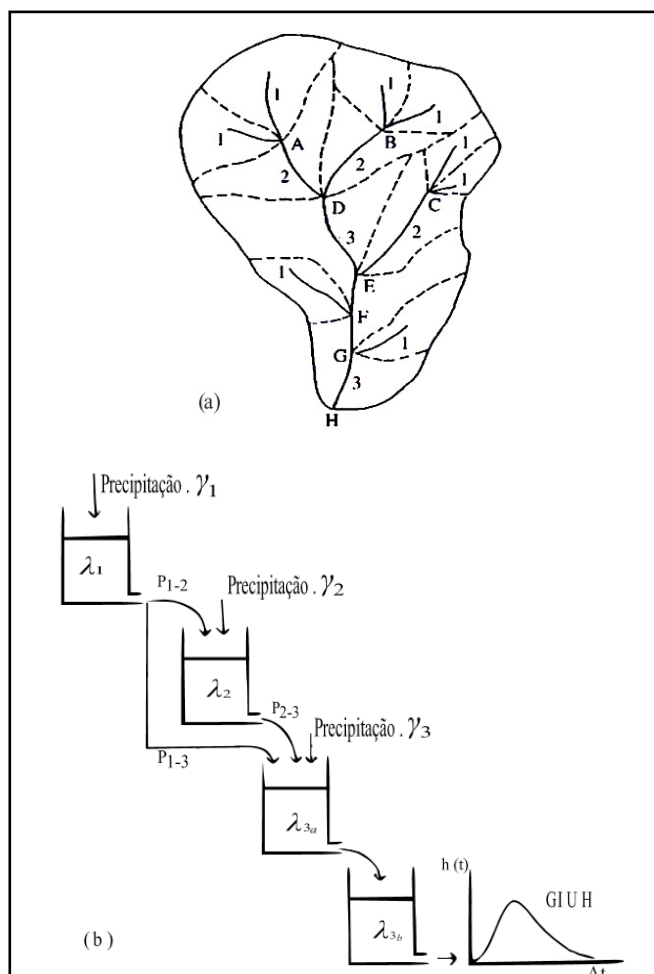


Figura 1 – Teoria do GIUH: (a) uma bacia hipotética de 3ª ordem com a representação das sub-bacias divididas de acordo com a ordem (i) dos canais e (b) representação de reservatórios lineares em cascata

Fonte - Modificado de Franchini e O'Connell, 1996

Tabela 1- Resumo das leis de Horton (1945)

Leis de Horton	Parâmetro da equação	Amplitude da variação dos parâmetros
Lei do Número de Canais	$R_B =$ taxa de bifurcação $R_B = N_w / N_{w+1}$	$3 < R_B < 5$
Lei do Comprimento de Canais	$R_L =$ taxa de comprimento $R_L = \bar{L}_{w+1} / \bar{L}_w$	$1,5 < R_L < 3,5$
Lei da Área da Bacia de Canais	$R_A =$ taxa de área $R_A = \bar{A}_{w+1} / \bar{A}_w$	$3 < R_A < 6$

Sendo N_w o número de segmento da ordem w ; \bar{L}_w o comprimento médio da ordem w ; e \bar{A}_w a área média das bacias de cada canal da ordem w .

tendem a auto-similaridade do sistema de canais da bacia. Nesse sentido, as referidas leis podem ser empregadas para determinar dimensões fractais de canais individuais e rede de canais.

Derivação do GIUH

A precipitação efetiva é considerada como sendo constituída por um número infinito de pequenas gotas, de tamanho uniforme e sem interação, que caem instantaneamente e homogeneamente ao longo de toda a região. O tempo de percurso, ao longo do canal, de uma gota de água aleatoriamente escolhido, a partir do seu ponto de partida para a saída, representa a PDF da bacia (BHADRA et al., 2008).

Durante o tempo de viagem da gota d’água ao longo de qualquer um dos canais, ela passa certa quantidade de tempo em cada um dos estados que compõem efetivamente o caminho. O tempo que uma partícula T_x gasta no estado x ($x = O_i$ ou $x = C_j$) é uma variável aleatória, que pode ser descrito por $f_x(t)$. Sendo a ordenada do HUI representada por $h(t)$, PDF:

$$h(t) = \sum [f_{x_{oi}}(t) * f_{x_j}(t) * f_{x_j}(t) * \dots * f_{x_k}(t)]_{\omega} \cdot Pr(\gamma) \quad (1)$$

onde f_{x_j} é a função do tempo de permanência da gota no canal de ordem (Ω); * é a operação de convolução; e $Pr(\gamma)$ é a probabilidade de a gota seguir o caminho γ .

Uma abordagem probabilística, Eq. (2), é aplicada na bacia de ordem (Ω) para encontrar a probabilidade de uma gota efetiva seguir um caminho γ

$(x_0 \rightarrow x_i \rightarrow x_j \rightarrow \dots x_{\Omega})$, isto é

$$P_r(\gamma) = \pi_{x_0} P_r_{x_0, x_{\omega+1}} \dots P_r_{x_{\omega+1}, x_{\omega+r}} \dots P_r_{x_{\Omega-1}, x_{\Omega}} \quad (2)$$

Gupta, Waymire e Wang (1980) comentaram que os resultados devem ser relacionados ao número de canais N_i para cada ordem i .

$$P_r_{i,j} = \frac{(N_i - 2 N_{i+1}) E(j, \Omega)}{\sum_{k=1}^{\Omega} E(k, \Omega) N_k} + \frac{2 N_{i+1}}{N_i} \delta_{i+1,j} \quad (3)$$

onde δ é a distribuição delta de Kronecker (unitário e diferente de zero somente se $j = i + 1$); e $E(i, \Omega)$ é o número médio de ligações no interior da ordem i em uma rede de drenagem finita de ordem Ω , cuja expressão é dada por:

$$E(i, \Omega) = N_i = \prod_{j=2}^i \frac{(N_{j-1} - 1)}{2 N_j - 1} \quad (4)$$

Para $i=2, \dots, \Omega$, igualmente, a probabilidade que uma gota caia em uma área de ordem ω é aproximado de acordo com as seguintes expressões (RODRÍGUEZ-ITURBE; VALDÉS, 1979).

$$\pi_i = \frac{N_i A_i}{A(\Omega)} \quad (5)$$

$$\pi_{\omega} = \frac{N_{\omega}}{A(\omega)} \left(A_{\omega} - \sum_{j=1}^{\omega-1} A_j \frac{N_j P_{r_{j,\omega}}}{N_{\omega}} \right) \quad (6)$$

Desprezando-se o tempo de permanência da água na superfície do terreno e os efeitos não lineares da transformação $P-Q$, Rodríguez-Iturbe e Valdés (1979) chegaram à seguinte expressão para o tempo de permanência médio da partícula num canal de x_i -ésima ordem:

$$\lambda_{x_i} = \bar{L}_{x_i} / v_{x_i} \quad (7)$$

onde λ_{x_i} em função do tamanho ou características de escala da bacia, sendo o número de λ_{x_i} igual à ordem da bacia, incorporando neste parâmetro a componente dinâmica de resposta da bacia; v_{x_i} é a velocidade média no canal de ordem (i), L_{x_i} é o comprimento médio do canal de ordem (i).

Portanto, $h(t)$ é representado pela Eq. (8).

$$f(t) = \lambda_{x_i} e^{-\lambda_{x_i} t} \quad (8)$$

A aplicação da Eq. (8) para todas as ordens de fluxo, incluindo as de maiores ordens (j) implicaria em um hidrograma para toda a bacia, representado por uma distribuição gama, com valor nulo na origem. Para evitar isso, Rodríguez-Iturbe e Valdés (1979) representaram o canal de ordem (j) por dois reservatórios lineares em série, resultando na seguinte equação (CARVALHO; CHAUDHRY, 2001; FRANCHINI; O’CONNELL, 1996;).

$$h^*(t) = \int_0^t h(\tau) 2 \lambda_j e^{-2 \lambda_j (t-\tau)} d\tau \quad (9)$$

O modelo subsequente representa a resposta do sistema a um impulso instantâneo (excitação) da unidade de volume aplicada na origem no tempo ($t = 0$). A resposta dos sistemas lineares e contínuos pode ser expressa, no domínio do tempo, em termos da função de resposta de impulso através da convolução integrante do seguinte modo,

$$Q(t) = \int_0^t i(\tau) h(t - \tau) \quad (10)$$

onde $i(\tau)$ é a precipitação efetiva; e $h(\tau)$ o GIUH.

Critérios para determinação da variável v

Rodríguez-Iturbe e Valdés (1979) sugeriram que PDF do tempo de deslocamento da gota nos canais é dada por uma distribuição exponencial, (Eq. 8), sendo λ estimado pela Eq. 7. Aqui, observa-se a dependência do GIUH em relação à dinâmica de v (KUMAR et al., 2004). Pois as características de não linearidade dos processos que transformam $P - Q$ podem ser modelados linearmente quando assumimos que v é constante no decorrer da bacia (PILGRIM, 1977). Para determinação de v existem vários métodos, entre os quais, destacam-se: em função da intensidade da precipitação efetiva (AL-WAGDANY;

RAO, 1997; BHASKAR; PARIDA; NAYAK, 1997; RODRÍGUEZ-ITURBE; DEROTO; VALDÉS, 1979; SAHOO et al., 2006); a relação entre o tempo de concentração (t_c) da bacia (KUMAR, 2015); e o comprimento do canal principal (CARVALHO; CHAUDRHY, 2001; STEFFEN et al., 2009).

$$v_{m\acute{a}x} = \frac{L}{t_c} \quad (11)$$

Além destes, Al-Wagdany e Rao (1997) avaliaram v através de uma análise de regressão linear em função da precipitação (P), mostrando que v é inversamente proporcional ao total da precipitação efetiva, ou seja,

$$v = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{P}\right) \quad (12)$$

onde β_0, β_1 são os coeficientes de regressão linear relacionado aos parâmetros geomorfológicos da bacia; e P é a precipitação (mm).

Villela (2001) gerou uma equação regionalizada da variável v para sete bacias no Estado de São Paulo, com áreas entre 40 e 270 km².

$$v = 2,774740 - 0,013127 \cdot A + 0,051679 \cdot L - 0,792506 \cdot Ic \quad (13)$$

onde A é a área da bacia [km²]; L é o comprimento do rio principal [km]; Ic é o índice de compactidade da bacia.

Nota-se que diversos autores abordaram diferentes formas de se determinar a variável v . Inclusive, Beven, Wood e Sivapalan (1988) e Franchini e O'Connell (1996) propuseram que v deve ser considerada puramente como um parâmetro de calibração.

Geometria Hidráulica

A teoria da Geometria Hidráulica (GH) foi proposta por Leopold e Maddock (1953) que a definiram como a medida da largura, profundidade, velocidade e carga sedimentar de um curso d'água natural. Esta teoria descreve a maneira pela qual as propriedades do canal fluvial mudam no decorrer do tempo e do espaço para suportar uma variedade de fluxos. Os autores estabeleceram as relações das variáveis da seção como funções potenciais, diferenciadas somente pelos valores de seus expoentes e coeficientes, ou seja:

$$w = a \cdot Q^b \quad (14)$$

$$d = c \cdot Q^f \quad (15)$$

$$v = k \cdot Q^m \quad (16)$$

onde Q é a vazão líquida [m³/s]; w é a largura (nesse caso adotou-se a largura da linha d'água no momento da medição de vazão) [m]; d é a profundidade média (profundidade em relação a cota de medição da vazão) [m]; v é a velocidade, determinada pela razão entre vazão líquida e área molhada da seção [m/s]; $a, c, e k$ são coeficientes; e b, f e m são expoentes.

Em qualquer tempo e lugar estas variáveis estão inter-relacionadas pela equação de continuidade de massa.

$$Q = wdv = (ack) \cdot Q^{b+f+m} \quad (17)$$

Assim, automaticamente, obtêm-se que $b+f+m=1$ e $ack=1$. Os valores b, f e m representam a inclinação da reta, enquanto, as constantes a, c e k expressam a intersecção da reta com o valor unitário do débito, colocado nas ordenadas. Por esse motivo, os valores numéricos das constantes aritméticas a, c e k não são muito significativos para geometria hidráulica dos rios, enquanto os dos expoentes b, f e m são muito importantes. A descrição detalhada desta teoria e sua revisão podem ser encontradas em Grison e Kobiyama (2011).

Geometria Fractal

A Geometria Fractal (GF) foi proposta por Mandelbrot (1983) para descrever padrões de distribuição, estruturas significativamente complexas da natureza, ou seja, formas irregulares, fragmentadas, especialmente aquelas que possuem auto-similaridade e/ou auto afinidade. Analisando a estrutura fractal da rede de drenagem e divisores topográficos dentro de bacias hidrográficas, localizadas na Colômbia e Estados Unidos da América, Puente e Castillo (1996) comentaram que a geometria fractal de redes de drenagem tem recebido considerável atenção por diversos autores, por exemplo, La Barbera e Rosso (1989), Liu (1992), Marani, Rigon e Rinaldo (1991), Rinaldo et al. (1992), Rodríguez-Iturbe et al. (1992) e Tarboton, Bras e Rodríguez-Iturbe (1988). Os maiores desenvolvimentos, na elucidação de uma variedade de expressões que relatam as dimensões fractais de uma bacia hidrográfica foram embasadas nas clássicas leis geomorfológicas (Tabela 1) propostas por Horton (1945).

Neste contexto, o presente trabalho aborda as dimensões fractais de acordo com as expressões demonstradas na tabela 2. Os parâmetros (df) e (Df) apresentados referem-se a dimensão fractal do canal e da bacia hidrográfica, respectivamente. Esta abordagem foi adotada com base em Schüller, Rao e Jeong (2001).

Tabela 2 – Equações empregadas para estimar a dimensão fractal, a partir das Leis de Horton

Autores	Equações	
	df	Df
Feder (1998)	$df = 2 \frac{\ln R_L}{\ln R_B}$	
Rosso, Bacchi e La Barbera (1991)	$df = \max\left(1, 2 \frac{\log R_L}{\log R_A}\right)$	
La Barbera e Rosso (1989)		$Df = \max\left(\frac{\log R_B}{\log R_L}, 1\right)$
Tarboton, Bras e Rodríguez-Iturbe (1990)		$Df = df \frac{\log R_B}{\log R_L}$
La Barbera e Rosso (1990)		$Df = \left(\frac{1}{2-df}\right) \frac{\log R_B}{\log R_L}$

Fonte - Modificado de Schüller, Rao e Jeong (2001).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia do rio Ijuí (10.650 km²), localiza-se na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, em uma posição central do derrame basáltico sul-americano, sobre o planalto médio gaúcho com altitudes entre 420 e 700 m (PEREIRA; KOBIYAMA; CASTRO, 2014). A bacia é formada principalmente pelos rios Potiribu, Conceição e Ijuizinho, todos afluentes da margem esquerda do rio Ijuí. O rio Ijuí por sua vez é afluente do rio Uruguai sendo sua foz localizada no município de Pirapó - RS. A figura 2 apresenta a espacialização das bacias, em estudo, embutidas na bacia do rio Ijuí. Pereira, Kobiyama e Castro (2013) estudando séries de precipitações de 27 anos, variando de 12/01/77 a 20/12/04, com dados coletados em 15 estações pluviométricas afirmaram que as precipitações da região apresentam homogeneidade temporal e espacial, sem a presença de uma sazonalidade nítida.

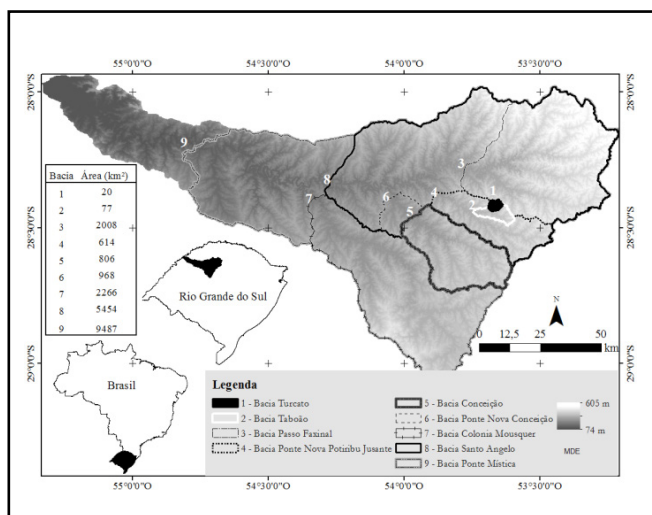


Figura 2 - Localização das bacias hidrográficas embutidas na bacia do rio Ijuí

Dados utilizados

No presente estudo foram analisadas informações morfológicas da bacia hidrográfica do rio Ijuí, através do modelo digital de elevação (MDE), com resolução de 90 m, base cartográfica vetorial do Rio Grande do Sul, na escala 1:50.000. Disponível em www.ecologia.ufrgs.br; acesso em 15/07/2013. Com o software ArcGIS para processamento dos dados, foram determinados os parâmetros de entrada R_B (taxa de bifurcação), R_A (taxa de área) e R_L (taxa de comprimento), apresentados na tabela 1. Os dados de P , Q e ν foram extraídos das séries históricas de estações pluviométricas e fluviométricas, implantadas na bacia, operadas pela (CPRM) Serviço Geológico do Brasil e sob responsabilidade da (ANA) Agência Nacional de Águas, dados obtidos em www.hidroweb.ana.gov.br; acesso em 03/04/2014. Salienta-se que os dados de Q e ν das bacias de Turcato e Taboão são oriundos de estações implantadas e operadas pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (CASTRO; CHEVALLIER, GOLDENFUM, 2000).

Os dados de P utilizados foram das estações pluviométricas (Condor, Passo Faxinal, Conceição, Passo Viola, Boa Vista, Girua, Tupaciretã e Coimbra), localizadas dentro e no entorno da bacia do rio Ijuí. As precipitações (diárias) foram determinadas em virtude dos eventos analisados, ou seja, foram utilizados os dados que geraram os hidrogramas estudados neste trabalho. Em decorrência da dispersão das estações na bacia, definiram-se pesos para cada estação pelo método de Thiessen, tanto para os eventos unitários quanto para a precipitação média anual. Posteriormente determinou-se a precipitação efetiva de cada evento pelo método de Soil Conservation Soil - SCS, com base em Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005). Em decorrência do uso e ocupação e do tipo de solo predominante na bacia do rio Ijuí, o valor do parâmetro CN é 87. O escoamento de base foi retirado dos hidrogramas observados utilizando a metodologia descrita em Carvalho e Chaudrhy (2001).

A tabela 3 apresenta de forma resumida a data dos eventos analisados, bem como a precipitação total ocorrida na bacia, no respectivo período, e as vazões de picos de cada evento

Tabela 3 – Resumo dos eventos utilizados

	Data dos eventos		Precipitação total no período	Ponte Mística	Santo Ângelo	Colônia Mousquer	Ponte Nova Conceição	Conceição	Ponte Nova Potinbu Jusante	Passo Faxinal	Taboão	Turcato
	Início	Fim	(mm)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)
Calibração	04/10/1979	20/10/1979	189,95	1747,30	1239,10	594,01	230,30	176,10	120,20	636,00	Sem dados	Sem dados
	04/07/1983	25/07/1983	194,76	2238,60	1434,60	790,09	281,70	203,40	210,10	561,93	Sem dados	Sem dados
	26/07/1987	22/08/1987	238,29	2463,60	1617,00	826,68	285,25	247,26	128,10	797,80	Sem dados	Sem dados
	20/09/1989	16/10/1989	139,43	1883,20	1362,90	810,25	390,56	267,56	171,80	605,96	Sem dados	Sem dados
	16/06/1991	10/07/1991	94,14	954,90	675,88	302,43	152,54	136,65	50,17	237,10	Sem dados	Sem dados
	13/11/1993	10/12/1993	167,37	1547,40	916,25	366,32	192,48	201,34	77,71	365,61	Sem dados	Sem dados
Validação	17/07/2011	30/07/2011	117,54	117,54	429,20	103,11	51,30	32,70	34,44	190,12	Sem dados	Sem dados
			166,52	Sem dados	970,65	377,00	168,34	184,76	57,04	595,71	13,96	6,43

de cada bacia hidrográfica. Já a tabela 4 apresenta os valores de precipitações médias anuais utilizadas como parâmetro de entrada no modelo proposto.

Tabela 4 – Precipitação média anual

Estação	Precipitação média anual (mm)
Ponte Mística	1725
Santo Ângelo	1742
Colônia Mousquer	1695
Conceição	1668
Ponte Nova Conceição	1668
Ponte Nova Potiribu Jusante	1695
Passo Faxinal	1831
Taboão	1659
Turcato	1659

Calibração e análise de regressão múltipla para determinação de (v)

No presente trabalho determinou-se o valor de λ_{x_i} pela Equação (7) para cada bacia de estudo, tomando-se valores aleatórios com distribuição de probabilidade uniforme.

Os valores do vetor λ_{x_i} foram restritos ao domínio definido por v máximas e mínimas da série histórica de cada bacia, a partir de valores medidos diretamente em campo. Com o vetor de valores λ_{x_i} e as precipitações efetivas referentes a sete eventos registrados nas sete bacias, foram gerados os hidrogramas de saída de cada evento. Através da função intrínseca “fmincon”, disponível no *Toolbox* do *Matlab*, estimou-se o vetor λ_{x_i} que minimiza o erro, avaliado com o coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970). Com λ calibrado e com os comprimentos médios de cada canal L_{x_i} , obteve-se para cada sub-bacia V_{x_i} associada ao canal de ordem (i). Finalmente, com os valores de V_{x_i} foi calculada a velocidade média no exutório de cada bacia de estudo, conforme a seguinte equação:

$$\bar{v}_j = \frac{\sum_{i=1}^{\omega} v_{xi}}{\omega} \quad (j = \text{Santo Angelo, Ponte mística, ...}) \quad (18)$$

onde ω representa a maior ordem do canal.

Através de uma regressão multivariada foram ajustadas equações lineares e potenciais que relacionam a \bar{v}_j com parâmetros de geometria hidráulica, geometria fractal e precipitação média anual, visando à regionalização de \bar{v}_j que é um parâmetro de entrada para a geração do GIUH (equação 8).

Como parâmetros de entrada para determinação das referidas equações testou-se as diferentes expressões de GF apresentadas na tabela 2, juntamente com *Pma* (Tabela 4) e os expoentes *b* e *f* (Tabela 5), os valores da tabela 5 foram definidos por Pereira, Kobiyama e Castro (2014). Com a calibração e a inserção das expressões citadas, chegou-se a três modelos de GIUH, denominados de (a) GIUH-C calibrado em função de v ; (b) GIUH-L oriundo da função linear resultante da inserção da GH, GF e *Pma* e (c) GIUH-P oriundo da função potencial resultante da inserção das mesmas variáveis. A figura 3 ilustra os procedimentos realizados para calibração e validação dos modelos propostos.

Cabe salientar que o modelo proposto se adequa para vazões $\geq Q_5$ da curva de frequência das vazões medidas em campo e para determinação deste ponto de corte $\geq Q_5$, foram utilizados dados de vazões observados em campo.

Tabela 5 - Valores dos expoentes b e f para estações fluviométricas

Estações fluviométricas	$\geq Q_5$	
	<i>b</i>	<i>f</i>
Ponte Mística	0,15	0,38
Santo Ângelo	0,30	0,25
Colônia Mousquer	0,22	0,33
Ponte Nova Conceição	0,12	0,31
Conceição	0,20	0,72
Ponte Nova Potiribu Jusante	0,14	0,29
Passo Faxinal	0,15	0,38

Fonte - Pereira, Kobiyama e Castro (2014)

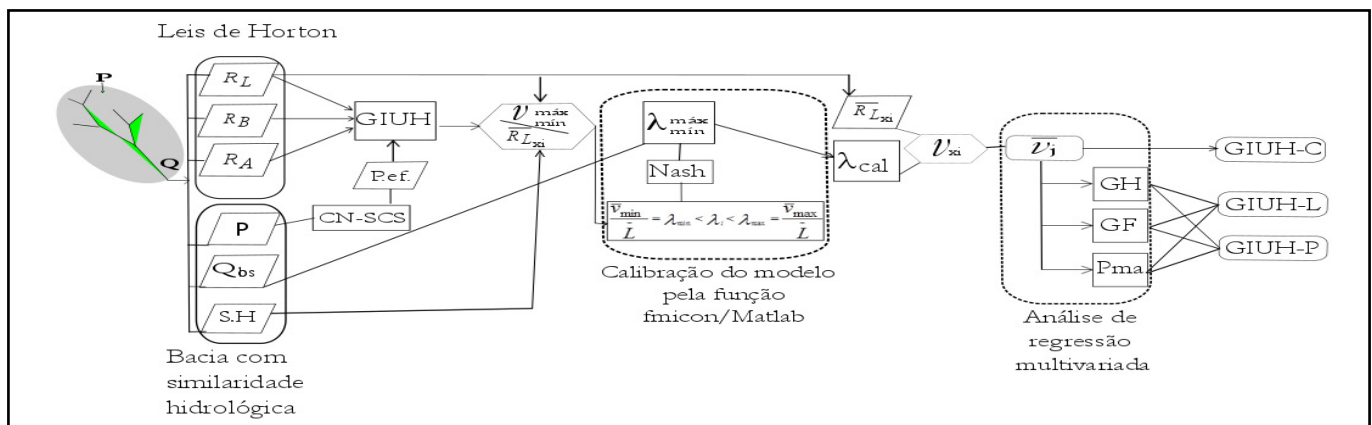


Figura 3 – Fluxograma de calibração e validação dos modelos GIUH-C, GIUH-L e GIUH-P

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Hidrogramas calibrados

Foram gerados 49 hidrogramas calibrados, referente a sete eventos ocorridos nas sete bacias em estudo. O hidrograma apresentado na figura 4 exemplifica os hidrogramas gerados para as bacias. Com o intuito de demonstrar a eficiência da calibração, apresenta-se na figura 5, através do gráfico *box-plot*, o erro relativo dos picos de vazão dos hidrogramas calibrados em relação aos observados.

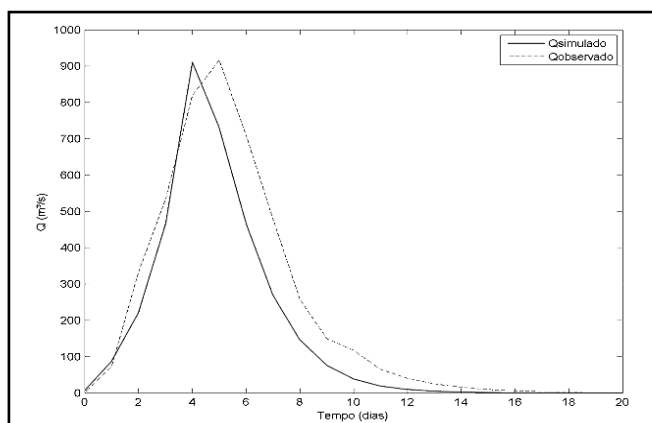


Figura 4 – Modelo calibrado e observado na bacia hidrográfica Santo Ângelo, no período de 13/11 a 12/12/1993

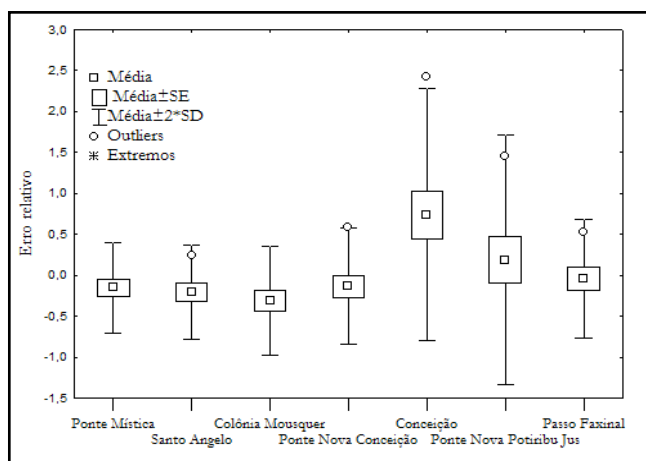


Figura 5 – Avaliação da eficiência dos hidrogramas calibrados em relação aos hidrogramas observados

Quando se analisa somente os valores superestimados o modelo obteve um erro relativo médio de 0,429 e quando se faz a análise para os valores subestimados o erro relativo médio é de -0,353. Consta-se na figura 5 que somente duas estações não apresentaram valores em *outliers* (Ponte Mística e Colônia Mousquer), sendo estes valores, oriundos do evento ocorrido de 16/11/2006 a 14/12/2006; quando retira-se este evento o modelo superestima os valores observados em 0,288; melhorando o desempenho do mesmo. Também se observa que as bacias de Conceição e Ponte Nova Potiribu Jusante foram as

que apresentaram maiores erros relativo (2,419 e 1,452), respectivamente, apresentando, conseqüentemente, erros relativos médios de 0,741 e 0,711, respectivamente. Quando se retira os valores de *outliers* nestas bacias o erro médio cai para 0,462 e 0,464, respectivamente. Isto comprova que a calibração proposta apresenta bom desempenho, pois na média os valores calibrados apresentam-se condizentes com os valores observados.

A calibração dos hidrogramas foi realizada em função do vetor de valores λ_x , e das precipitações efetivas de cada evento. Para definição das precipitações efetivas foi utilizado o método CN-SCS, no qual, observou-se que a geração dos hidrogramas eram extremamente sensíveis ao valor estimado. No presente trabalho, o valor CN foi generalizado para todos os eventos não sendo levada em consideração a umidade antecedente. Esta sensibilidade do valor de CN e a não consideração da umidade antecedente pode explicar os valores *outliers* encontrados na calibração. Assim sendo, pode-se dizer que a adoção do único valor de CN sem consideração da umidade antecedente é um fator limitante na calibração.

Em relação ao tempo de pico entre os valores calibrados e observados, a figura 6 demonstra o quanto os hidrogramas calibrados foram anteriores ou posteriores, em média, os picos observados. Consta-se que na maioria dos casos os picos foram antecedentes aos observados, dos 49 hidrogramas calibrados, 27 hidrogramas antecederam o tempo de pico, seis hidrogramas foram posteriores ao tempo de pico observado e 16 hidrogramas tiveram o tempo de pico no mesmo dia que o observado.

A bacia de Ponte Mística foi a que obteve maior incidência de erros, dos sete hidrogramas calibrados, seis tiveram seu tempo de pico antecipados, variando de um a três dias, e somente um hidrograma calibrado teve o tempo de pico no mesmo dia do observado. Já a bacia de Conceição obteve os melhores resultados, sendo que dos sete hidrogramas calibrados, cinco hidrogramas tiveram o tempo de pico no mesmo dia do observado e dois hidrogramas precederam o pico observado em um dia.

Do ponto de vista hidrológico para previsão de ondas de cheias, a antecipação do tempo de pico é preferencial, pois com sua antecedência em relação ao observado pode-se acionar um sistema de alerta, no qual, auxiliaria na prevenção e tomada de decisão.

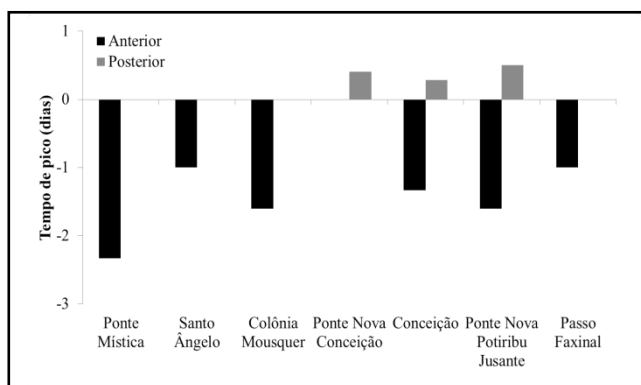


Figura 6 - Erro do tempo de pico dos valores simulados

Hidrogramas Validados

Beven, Wood e Sivapalan (1988) colocaram que o problema da relação entre a escala da bacia hidrográfica e sua linearidade de resposta exige muito mais pesquisa, de uma forma que se deve ter em conta a relação entre a morfologia e os processos hidrológicos da bacia. Com o intuito de contribuir para a colocação desses autores, o presente trabalho apresenta os parâmetros de Pma (Tabela 4), GH (Tabela 5) e GF (Tabela 6) para determinar \bar{v}_j , através de uma regressão multivariada. Com \bar{v}_j das sub-bacias inseridas a bacia hidrográfica do rio Ijuí (Figura 2), pretende-se estimar vazões em locais com poucos dados, ou até mesmo sem dados, utilizando a metodologia do GIUH.

São apresentados na tabela 6 os valores de GF das sete sub-bacias, estimadas por diferentes métodos, na qual, pode-se observar que os resultados encontrados se assemelham aos valores apresentados por Mandelbrot (1983), em que os padrões fractais dos canais (df) são em torno de 1,1 e os padrões fractais da rede de drenagem (Df) são próximos a 2,0. Isso confirma que esta metodologia se adequa para prever as dimensões geomorfológicas de uma bacia hidrográfica.

Com os valores de Pma, GH e GF utilizando ν como variável dependente, realizou-se a análise de regressão multivariada, sendo as funções testadas na forma linear e potencial. Na referida análise os parâmetros independentes, Pma (Tabela 4) e GH (Tabela 5) são constantes para cada bacia analisada e a GF (Tabela 6) variável de acordo com a equação proposta.

Quando se considera Df juntamente com Pma para prever valores de ν obtém-se valores de R² de -0,11. Os valores da GH quando avaliados juntamente com Pma para estimar

valores de ν obteve-se R² de 0,13. Com isso, conclui-se que a GF e GH quando abordadas separadamente não se adequaram para prever vazões unitárias. No entanto, quando se avaliou o desempenho da Df, proposta por La Barbera e Rosso (1990), juntamente com a GH e Pma, através da regressão multivariada obteve-se R² de 0,38; tanto para a forma linear quanto para a forma potencial, conforme é demonstrado na tabela 7.

Com os valores da GF apresentados na tabela 6 definiu-se as equações linear e potencial (Equação 19 e 20) da variável dependente ν regionalizada.

$$\nu = -1,646 + 4,279 \cdot Df + 0,002 \cdot P + 5,984 \cdot b + 0,003 \cdot f \quad (19)$$

$$\nu = e^{-5,774 \cdot Df} \cdot P^{9,887} \cdot b^{4,185} \cdot f^{0,146} \quad (20)$$

Tabela 7 - Valores de R² ajustados das dimensões df e Df testadas

Método		Para vazões $\geq Q_5$	
		Linear	Potência
Feder (1998)	df	0,20	0,11
Rosso, Bacchi e La Barbera (1991)	df	0,24	0,20
La Barbera e Rosso (1989)	Df	0,21	0,11
Tarboton, Bras e Rodríguez-Iturbe (1990)	Df	0,29	0,10
La Barbera e Rosso (1990)	Df	0,38	0,38

Tabela 6 – Valores das dimensões fractais estimados por diferentes métodos

Bacia	Feder (1998)	Rosso, Bacchi e Barbera (1991)	df	La Barbera e Rosso (1989)	Tarboton, Bras e Rodríguez-Iturbe (1990)	La Barbera e Rosso (1990)	Df
	df	df	Média	Df	Df	Df	Média
Ponte Mística	1,26	1,19	1,23	1,59	1,89	1,96	1,81
Santo Ângelo	1,29	1,20	1,25	1,55	1,86	1,94	1,78
Colônia Mousquer	1,47	1,33	1,40	1,36	1,80	2,01	1,72
Ponte Nova Conceição	1,27	1,19	1,23	1,57	1,87	1,93	1,79
Conceição	1,14	1,07	1,11	1,75	1,87	1,88	1,83
Ponte Nova Potiribu	1,35	1,24	1,30	1,48	1,84	1,96	1,76
Jusante Passo Faxinal	1,19	1,11	1,15	1,69	1,87	1,90	1,82
Média	1,28	1,19	1,24	1,57	1,86	1,97	1,79

Com as equações de determinação do GIUH a partir de ν regionalizada, denomina-se de agora em diante os valores de Q oriundos da equação 19 e 20 de GIUH-L e GIUH-P, respectivamente, e os valores de Q oriundos de ν calibrados denomina-se de GIUH-C.

Para validar os modelos apresentados, os picos de vazões calculados (Figura 7) e os tempos de pico (Figura 8) dos hidrogramas gerados GIUH-L, GIUH-P e GIUH-C foram comparados com os picos de vazões dos hidrogramas observados. Para tal, foi utilizado o evento ocorrido de 17 a 30/07/2011, incluindo agora as sub-bacias Turcato e Taboão e excluída a bacia Ponte Mística, por esta ter sido desativada em período anterior. Na figura 7 é apresentada de forma esquemática a percentagem de erros entre os valores observados e os calculados, ou seja, quanto mais próximo a zero forem os valores dos erros calculados, melhor o modelo (Linear, Potencial ou Calibrado) consegue estimar as vazões de pico nas respectivas bacias. Observa-se que em todas as bacias com exceção da bacia de Ponte Nova Potiribu Jusante e Colônia Mousquer os modelos propostos apresentaram erros menores que 0,5; chegando a -0,15 para o modelo potencial na estação de Conceição.

Observa-se que os HU (Figura 7) gerados apresentam valores de vazão de pico próximos aos valores observados, sendo o erro relativo na faixa de -0,332 e -0,343 quando ocorre subestimação dos modelos linear e potencial, respectivamente; e em média 0,729 e 0,853 quando há a superestimação por parte dos modelos propostos, linear e potencial, respectivamente.

Constata-se que na superestimação os erros relativos apresentam valores significativos. Isso é explicado pelos valores encontrados na bacia de Ponte Nova Potiribu Jusante, no qual, os modelos (GIUH-L e GIUH-P) superestimaram a vazão observada em 1,573 e 1,899, respectivamente. Porém, no momento que se retira essa estação, da análise de validação, o modelo reduz a superestimação para 0,30; o que é um valor razoável para a magnitude das vazões analisadas.

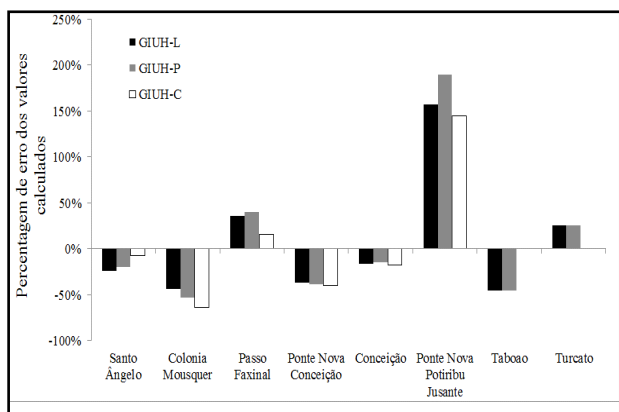


Figura 7 – Percentagem de erros dos valores calculados em relação aos valores de pico observados

Na figura 8, observa-se que os picos de vazões na estação de Santo Ângelo, Colônia Mousquer, Passo Faxinal e Ponte Nova Potiribu Jusante anteciparam o pico observado em um e dois dias. Na estação de Turcato o pico foi posterior ao observado e na estação de Ponte Nova Conceição, Conceição e Taboão os

picos foram no mesmo dia. Discutindo este resultado em um âmbito de gerenciamento de recursos hídricos para a previsão de enchentes pode-se dizer que os resultados se demonstraram satisfatórios, pois é melhor que o modelo antecipe os picos de vazões do que postergue os mesmos.

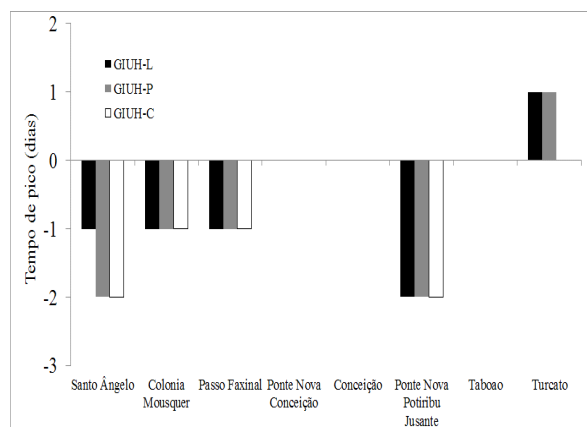


Figura 8 – Tempo de picos dos modelos propostos

Para dar uma melhor visualização dos modelos propostos e o seu comportamento em relação aos hidrogramas observados a figura 9 demonstra os resultados para os modelos propostos comparando-os com os valores observados na estação de Santo Ângelo, no evento ocorrido de 17 a 30/07/2011.

Os modelos propostos GIUH-L e GIUH-P que utilizam a inserção de parâmetros da GH, GF e Pma demonstram valores satisfatórios para prever vazões ($\geq Q_5$) em eventos unitários em bacias com poucos dados ou até mesmo sem dados.

Além de ter-se obtido resultados satisfatórios, os modelos propostos apresentam a vantagem de seus parâmetros de entrada ser de fácil obtenção. Sabendo-se a GH da bacia em análise, ou de bacias vizinhas a esta, pode-se inferir estes parâmetros à bacia. No caso da GF, seus valores podem ser facilmente determinados a partir do MDE utilizando *softwares* de geoprocessamento, não precisando estes dados ser coletados em campo, o que facilita muito a utilização deste parâmetro para prever vazões. A Pma é um parâmetro facilmente adquirido, pois o monitoramento pluviométrico é de fácil realização e existe uma gama de estações em operação com uma série histórica considerável.

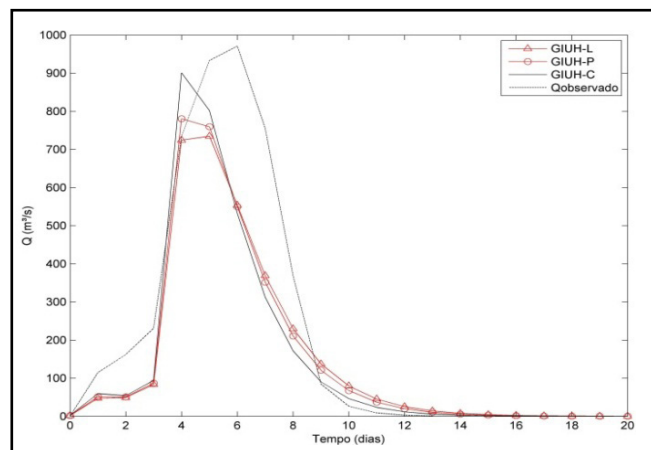


Figura 9 – Hidrogramas observado, calibrado, linear e potencial

CONCLUSÕES

Com a determinação de \bar{v}_j , a partir de λ calibrado e dos comprimentos médios de cada canal \bar{L}_{x_i} , foi possível gerar HU calibrados. Estes HU apresentaram valores satisfatórios, com exceção do evento ocorrido na estação de Conceição e Ponte Nova Potiribu Jusante de 16/11/2006 a 14/12/2006, demonstrando-se ser uma metodologia adequada para inferir vazões.

Após calibrado o modelo, através de uma regressão multivariada foram ajustadas equações lineares e potenciais que relacionam \bar{v}_j com parâmetros de Pma, GH e GF, visando regionalizar \bar{v}_j que é um parâmetro de entrada para a geração do GIUH. Esses parâmetros Pma, GH e GF, são metodologias também já conhecidas no meio científico, no entanto, as mesmas não foram utilizadas em conjunto com o intuito de prever vazões. Os modelos GIUH-L e GIUH-P apresentaram bons resultados, demonstrando que estes se adequam para estimar vazões em locais com poucos dados ou até mesmo sem dados, que é o princípio da regionalização.

Limitações dos modelos GIUH-L e GIUH-P:

- Salienta-se que para elaboração do presente trabalho foram utilizados eventos com vazões $\geq Q_5$. Para analisar o comportamento dos modelos propostos em vazões médias. Recomenda-se que para futuras pesquisas sejam utilizados hidrogramas observados com vazões de pico em torno da Q_{50} .
- A determinação da precipitação efetiva, que é um parâmetro de entrada do GIUH, foi pelo método CN-SCS. No presente estudo pode-se observar que este parâmetro é extremamente sensível na geração de vazões, assim sendo recomenda-se a inserção de uma metodologia mais fidedigna com a realidade das bacias brasileiras para inferir precipitação efetiva.
- Os erros relativos dos modelos GIUH-L e GIUH-P para as bacias de Taboão e Turcato foram de - 0,456 e 0,254, respectivamente, tanto para a forma linear quanto para a forma potencial. Mesmo sendo estes valores aceitáveis para inferir vazões, salienta-se que estas bacias não entraram nos eventos de calibração do modelo, em virtude da não existência de dados observados nos períodos dos eventos escolhidos, o que pode ter afetado a extrapolação para pequenas bacias. Salienta-se, portanto, a necessidade da continuidade do monitoramento, principalmente em pequenas bacias. Pois em pequenas bacias as inter-relações de P-Q não seguem uma linearidade, dificultando a extrapolação por parte dos modelos hidrológicos. Porém, com o monitoramento contínuo e a inserção da GH e GF para determinar vazões, esta lacuna poderá ser preenchida.

REFERÊNCIAS

AGIRRE, U.; GONI, M.; LOPEZ, J. J.; GIMENA, F. N. Application of a Unit Hydrograph based on sub catchment division and comparison with Nash Instantaneous Unit

Hydrograph. *Catena*, v. 64, n. 2, p. 321-332, Nov. 2005.

AL-WAGDANY, A. S.; RAO, A. R. Estimations of the velocity parameter of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Water Resour. Manag.*, v. 11, n. 1, p. 1-16, Feb. 1997.

BEVEN, K. J.; WOOD, E. F.; SIVAPALAN, M. On hydrological heterogeneity – catchment morphology and catchment response. *J. Hydrol.*, v. 100, n. 1-3, p. 353-375, July 1988.

BHADRA, A.; PANIGRAHY, N.; SINGH, R.; RAGHUWANSHI, N. S.; MAL, B. C.; TRIPATHI, M. P. Development of a geomorphological instantaneous unit hydrograph model for scantily gauged watersheds. *Environ. Modell. Software*, v. 23, p. 1013-1025, 2008.

BHASKAR, N. R.; PARIDA, B. P.; NAYAK, A. K. Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. *J Water Resour. Plann. Manag.*, v. 123, n.4, p. 228-238, July 1997.

CARVALHO, M. A. de; CHAUDRHY, F. H. Aplicação de Hidrograma Unitário Geomorfológico na previsão de respostas hidrológicas. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 6, n. 4, p. 5-17, out./dez. 2001.

CASTRO, N. M. R.; CHEVALLIER, P.; GOLDENFUM, J. A. *Projeto Potiribu-Atualização 1989-1998*. Dados básicos de Fluviometria e Pluviometria. Porto Alegre: ABRH, 2000.

CHOW, V. T. *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1964.

CUDENNEC, C.; FOUAD, Y.; SUMARJO I.; DUCHESNE, J. A geomorphological explanation of the Unit Hydrograph concept. *Hydrol. Process.*, v. 18, n. 4, p. 603-621, Mar; 2004.

FEDER, J. *Fractal*. New York: Plenum Press, 1998.

FRANCHINI, M.; O'CONNELL, P. E. An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *J. Hydrol.*, v. 175, n. 1-4, p. 407-428, Feb. 1996.

GRISON, F.; KOBAYAMA, M. Teoria e aplicação da geometria hidráulica: revisão. *RBG: revista brasileira de geomorfologia*, v. 12, n. 2, p. 25-38, 2011.

GUPTA, V. K.; WAYMIRE, E.; WANG, C. T. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.*, v. 16 n. 5, p. 863-870, Oct. 1980.

HALL, M. J.; ZAKI, A. F.; SHALIN, M. M. A. Regional analysis using the Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 5, n. 1, p. 93-102, 2001.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

- HRACHOWITZ, M.; SAVENIJE, H. H. G.; BLÖSCHL, G.; MCDONNELL, J. J.; SIVAPALAN, M.; POMEROY, J. W.; ARHEIMER, B.; BLUME, T.; CLARCK, M. P.; EHRET, U.; FENICIA, F.; FREER, J. E.; GELFAN, A.; GUPTA, H. V.; HUGHES, D. A.; HUT, R. W.; MONTANARI, A.; PANDE, S.; TETZLAFF, D.; TROCH, P. A.; UHLENBROOK, S.; WAGENER, T.; WINSEMIUS, H. C.; WOODS, R. A.; ZEHE, E.; CUDENNEC, C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review. *Hydrol. Sci. J.*, v. 58, n. 6, 1198-255, 2014.
- KHALEGHI, M. R.; GHODUSI, J.; AHMADI, H. Regional Analysis Using the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) Method. *Soil Water Res.*, v. 9, n. 1, p. 25-30, 2014.
- KUMAR, A. Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Based Hydrologic Response Models for Ungauged Hilly Watersheds in India. *Water Resour. Manag.*, v. 29, n. 3, p. 863-883, Feb. 2015.
- KUMAR, R.; CHATERRJEE, C.; SINGH, R. D.; LOHANI, A. K.; KUMAR, S. GIUH based Clark and Nash models for runoff estimation for an ungauged basin and their uncertainty analysis. *Int. J. River Manag.*, v. 2, n. 4, p. 281-290, Dec. 2004.
- LA BARBERA, P.; ROSSO, R. On the fractal dimensions of stream networks. *Water Resour. Res.*, v. 25, n. 4, p. 735-741, Mar. 1989.
- LA BARBERA, P.; ROSSO, R. "Reply". *Water Resour. Res.* v. 26, n. 9, p. 2245-2248, 1990.
- LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Washington: United States Geological Survey, 1953. (Geological survey professional paper 252).
- LIU, T. Fractal structure and properties of stream networks. *Water Resour. Res.*, v. 28, n. 11, p. 2981-2988, Nov. 1992.
- MANDELBROT, B. B. *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W.H. Freeman, 1983.
- MARANI, A.; RIGON, R.; RINALDO, A. A note on fractal channel networks. *Water Resour. Res.*, v. 27, n. 12, p. 3041-3049, Dec. 1991.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *J. Hydrol.*, v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr. 1970.
- NOURANI, V.; SINGH, V. P.; DELAFROUZ, H. Three geomorphological rainfall-runoff models based on the linear reservoir concept. *Catena*, v. 76, n. 3. p. 206-214, Mar. 2009.
- PEREIRA, M. A. F.; KOBIYAMA, M.; CASTRO, N. M. R. Análise de homogeneidade da precipitação na bacia hidrográfica do rio Ijuí - RS. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves, RS. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2013. CD-ROM.
- PEREIRA, M. A. F.; KOBIYAMA, M.; CASTRO, N. M. R. Relação entre a Geometria Hidráulica e a Curva de Permanência em estações fluviométricas da bacia do rio Ijuí – RS. *RBG: revista brasileira de geomorfologia*, v. 15, n. 3, p. 443-454, jul.-set. 2014.
- PILGRIM, P. H. Isochrones of travel time and distribution of flood storage from a tracer study on a small watershed. *Water Resour. Res.*, 13, n. 3, p. 587-595, June 1977.
- PUENTE, C. E.; CASTILHO, P. A. On the fractal structure of networks and dividers within a watershed. *J. Hydrol.*, v. 187, n. 1-2, p. 173-181, Dec. 1996.
- RINALDO, A.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; RIGON, R.; BRAS, R. L.; IJJASZ-VASQUEZ, E.; MARANI, A. Minimum energy and fractal structures of drainage networks. *Water Resour. Res.*, v. 28, n. 9, p. 2183-2195, Sept. 1992.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; DEROTO, G.; VALDÉS, J. B. Discharge response analysis and hydrologic similarity: the interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics. *Water Resources Research*. v. 15, n. 6, p.1435-1444, Dec. 1979.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; IJJASZ-VASQUEZ, E.; BRAS, R. L.; TARBOTON, D. G. Power law distributions of discharge mass and energy in river basins. *Water Resour. Res.*, v. 28, n. 4, p. 1089-1093, Apr. 1992.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; RINALDO, A. *Fractal River Basins: change and self-organization*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; VALDÉS, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resour. Res.*, v. 15, n. 6, p. 1409-1420, Dec. 1979.
- ROSSO, R.; BACCHI, B.; LA BARBERA, P. Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks. *Water Resour. Res.*, v. 27, n. 3, p. 381-387, Mar. 1991.
- SAHOO, B.; CHANDRANATH, C.; NARENDRA, S. R.; SINGH, R.; KUMAR, R. Flood estimation by GIUH-based Clark and Nash models. *J. Hydrol. Eng.*, ASCE, v. 11, n. 6, p. 515-525, Nov. 2006.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos, parte 1: Classificação. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 10, n. 4, p. 5-18, out./dez. 2005.
- SCHÜLLER, D. J.; RAO, A. R.; JEONG, G. D. Fractal characteristics of dense stream networks. *J. Hydrol.*, v. 243, n.

1, p. 1-16, 2001.

SHERMAN, L. K. Stream flow from rainfall by the unit- graph method. *Engin. News-Rec.*, v. 108, p. 501-505, 1932.

STEFFEN, J. L.; ANDRADE, A. C. de S.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S. de; RODRIGUES, D. B. B. *Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico Aplicado a Bacias Desprovidas de Dados Hidrológicos. São Paulo, UNESP. Geociênc.*, v. 28, n. 3, p. 247-254, 2009.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I. Comment on “On the Fractal Dimension of Stream Networks”. *Water Resour. Res.*, v. 26, n. 9, p. 2243-2244, Sept. 1990.

TARBOTON, D.G.; BRAS, R. L.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I. The fractal nature of river networks. *Water Resour. Res.*, v. 24, n. 8, p. 1317-1322, Aug. 1988.

VILLELA, M. C. de C. *Análise do Hidrograma Unitário Geomorfológico e Regionalização do parâmetro de velocidade*. 2001. 92 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000359430>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

Contribuição dos autores

Marco Alésio Figueiredo Pereira: Revisão da metodologia proposta, redação do artigo, tabulação dos dados utilizados, elaboração do modelo proposto, interpretação dos resultados e fechamento do texto.

Gabriel Fernando Narváez Campo: Elaboração do modelo proposto, interpretação dos resultados e fechamento do texto.

Masato Kobiyama: Orientador do trabalho, concepção da metodologia proposta, interpretação dos resultados e fechamento do texto.

Nílza Maria dos Reis Castro: co-orientadora do trabalho, interpretação dos resultados e fechamento do texto.