UM ESTUDO SOBRE A DEFINIÇÃO DA DURAÇÃO CRÍTICA DA CHUVA DE PROJETO NA BACIA DA UFSC, FLORIANÓPOLIS-SC

Camyla Innocente[1] ; Leonardo R. Monteiro [2]; Claudia W. Corseuil [3]; Masato Kobiyama[4], & Pedro L. B. Chaffe [5]

ABSTRACT – The duration of the design storm is an important parameter that modifies the hydrograph peak and total flow volume. The objective of this work was to evaluate the critical duration for the design storm of the UFSC basin using several return periods. We followed three steps for the determination of the design hydrograph: i) The Eckhardt (2005) baseflow filter was applied for the hydrograph separation; ii) the total runoff volume was calculated using the SCS method; and iii) the hydrograph shape was calculated according to Mockus (1957). The design hyetograph was determined with the Huff fourth quartile curve. The peak time was calculated with the simplex method for minimizing the error of the simulated and observed hydrograph peak. The critical duration for the design storm was found to be 80-110 min, which is higher than the estimated time of concentration of 30 min. The hydrograph peak was underestimated when we considered the time of concentration for calculating the design storm. The results confirm the importance to evaluate several storm durations when calculating the worst-case for the design hydrograph.

Palavras-Chave – chuva de projeto; hietograma; duração crítica

1) Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n, Florianópolis-SC, camylainnocente@gmail.com, (48) 37219000
2) Universidade do Estado de Santa Catarina, Rua Paulo Malschitzki, 200, Joinville-SC, leonardoromeromonteiro@gmail.com, (51) 33086565
3) Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n, Florianópolis-SC, claudia.weber@ufsc.br, (48) 37219000
4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre-RS, masato.kobiyama@ufrgs.br, (51) 33086324
5) Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n, Florianópolis-SC, pedro.chaffe@ufsc.br, (48) 37219000

1 - INTRODUÇÃO

A duração da chuva é um dado utilizado para se obter hietogramas e hidrogramas de projeto, partindo-se, geralmente, de uma Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF). Quando se emprega o Método Racional, normalmente, utiliza-se como tempo de duração da precipitação o tempo de concentração da bacia hidrográfica (TUCCI, 2007). Para uma metodologia simplificada, a utilização do Método Racional com esta consideração de duração de chuva pode ser suficiente, porém quando se tem necessidade de um projeto mais confiável, esta metodologia pode não ser adequada, necessitando-se de modelos hidrológicos mais confiáveis.

Os parâmetros utilizados em projetos de engenharia são dimensionados para a pior situação, que no caso de modelos hidrológicos se reflete na maior vazão de pico ou ainda no maior volume gerado. Desta forma, o tempo de duração da chuva, não necessariamente será o tempo de concentração da bacia, sendo necessário determinar o tempo de duração da chuva que provoca o pior cenário.

Neste sentido, foi proposto o tempo de duração crítica (MAIDMENT, 1993), que é o tempo de duração da chuva que provoca a maior vazão de pico, utilizando-se um modelo chuva-vazão. O tempo de duração crítica é muito pouco discutido nas bibliografias básicas de hidrologia, necessitando-se de mais pesquisas para a compreensão da sensibilidade deste parâmetro na modelagem hidrológica.

O presente trabalho determina tempos de duração crítica para um modelo hidrológico, utilizando o método de otimização *simplex search method* de Lagarias *et al*. (1998), variando-se o período de retorno da equação IDF. Os resultados do modelo hidrológico utilizando o tempo de concentração são comparados aos resultados utilizando os tempos de duração crítica encontrados.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) é a bacia hidrográfica (4,09 km²) onde o Campus João David Ferreira Lima da Universidade Federal de Santa Catarina está localizado. Dois eventos de chuva-vazão medidos na exutória da bacia foram utilizados para calibrar e validar o modelo hidrológico que será apresentado a seguir.

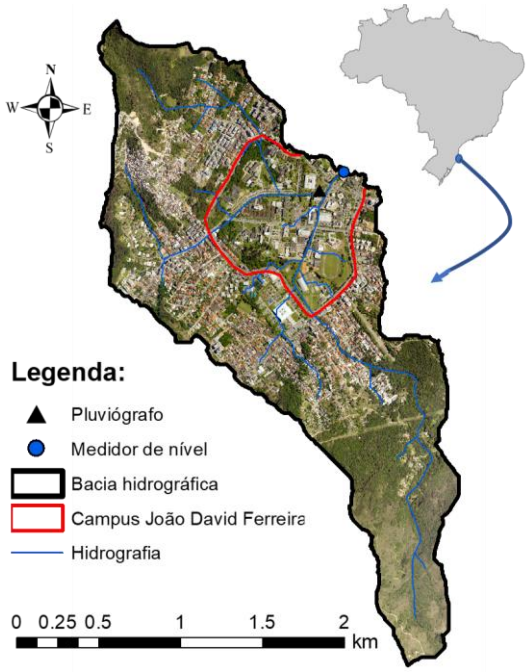

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica estudada.

2.2 - Simulação do hidrograma

O modelo hidrológico consiste em três partes: i) Eckhardt (2005), para definição do escoamento de base; ii) *Curve Number,* para a definição da chuva efetiva; e iii) Mockus (1957), para a definição do formato do hidrograma. Os eventos foram medidos em 2006 com discretização temporal de um minuto para a chuva e para a vazão. A chuva dos eventos foram 13 e 14,8 mm.

2.2.1 - Escoamento de base

O filtro digital de Eckhardt (2005) foi calibrado visualmente, verificando o escoamento de base no ponto de inflexão:

$$Qb_i = \frac{(1 - BFI)aQb_{i-1} + (1 - a)BRFQ_i}{1 - aBFI} \quad (1)$$

onde *Qbi* [L³/T] é o escoamento de base no momento *i*; *BFI* é a constante do índice máximo de escoamento de base; *a* [1/T] é o parâmetro que representa o decaimento exponencial no período de recessão e *Q* [L³/T] é o escoamento total. Os valores dos parâmetros calibrados foram *a* = 0,995 s^{-1} e *BF*I = 0,80.

O volume do escoamento rápido foi calculado utilizando integração numérica trapezoidal:

$$V_{Qq} = \sum_{i=2}^{n} \Delta t \frac{(Q_i - Qb_i) + (Q_{i-1} - Qb_{i-1})}{2} \quad (2)$$

onde V_{Qq} [L³] é o volume do escoamento rápido e Δt [T] é a discretização temporal.

2.2.2 - Distribuição da chuva efetiva

A definição de chuva efetiva utilizada nesse trabalho é a parte da chuva que escoa da bacia na forma de escoamento rápido:

$$Pef = \frac{V_{Qq}}{A} \quad (3)$$

onde *Pef* [L] é a chuva efetiva e *A* [L^2] é a área da bacia.

Foi utilizado o método *Curve Number* (*CN*) para determiner a distribuição da chuva efetiva:

$$Pefacu = \begin{cases} 0 \rightarrow Pacu <= Ia \\ \dfrac{(Pacu - Ia)^2}{Pacu - Ia + \left(\dfrac{25400}{CN} - 254\right)} \rightarrow Pacu > Ia \end{cases} \quad (4)$$

onde *Ia* [L] é abstração inicial, na qual toda chuva evapora, intercepta ou infiltra, não contribuindo para o escoamento rápido; *Pacu* [L] é a chuva acumulada no tempo; *Pefacu* [L] é a chuva efetiva acumulada no tempo; e *CN* é um parâmetro adimensional.

O *CN* não deve ser usado para regiões fora de centro-oeste dos Estados Unidos da América, onde o método foi calibrado. Assim, foi determinado um *CN* por evento, utilizando a Equação (4).

2.2.3 - Formato do hidrograma

Foi utilizada a convolução do hidrograma unitário para definir o formato do hidrograma:

$$Qs_n = \sum_{i=1}^{n} P_i HU_{n-i+1} \quad (5)$$

onde *Qs* [L/T] é o hidrograma de cheia normalizado; *n* é a duração da chuva; *P* [L/T] é a chuva efetiva; e *HU* [L/T] é o hidrograma unitário.

O modelo de hidrograma unitário utilizado no estudo foi proposto por Mockus (1957):

$$\frac{Q}{Q_p} = e^m \left[\left(\frac{t}{t_p}\right)^m\right]\left[e^{\left(-m\left(\frac{t}{t_p}\right)\right)}\right] \quad (6)$$

onde *Q* [L/T] é vazão normalizada; Q_p [L/T] é o pico do hidrograma normalizado; *m* é um parâmetro adimencional; *t* [T] é o tempo; e t_p [T] é o tempo de pico.

O valor t_p foi calculado utilizando a fórmula de Kirpich (1940):

$$t_c = 0{,}019\mathrm{L}^{0{,}77}S^{-0{,}385} \quad (7)$$

$$t_p = 0{,}6t_c \quad (8)$$

onde t_p e t_c são os tempos de retardamento e de concentração, respectivamente (min); L é o comprimento do rio principal (m); e *S* é a declividade do rio principal (m/m).

Foi calibrado o parâmetro *m*. O algoritimo de calibração utilizado foi o *Simplex Search Method* de Lagarias *et al.* (1998), com a função objetivo:

$$OF = abs(P_o - P_s) \quad (9)$$

onde P_o é o valor do pico observado [L/T]; e P_s é o valor do pico simulado [L/T].

Para a validação do hidrograma, foi modificado o filtro de Eckhardt (2005), considerando o valor total da vazão do hidrograma como sendo o escoamento rápido no tempo *i* somado ao escoamento de base no tempo *i*-1:

$$Qb_i = \frac{(1 - BFI)aQb_{i-1} + (1 - a)BRF(Qb_{i-1} + Qs_i)}{1 - aBFI} \quad (10)$$

2.3 - Chuva de projeto

Para determinar o volume de chuva, foi utilizada a equação de chuvas intensas da cidade de Florianópolis:

$$i_{máx} = \frac{145{T_R}^{0,25}}{(t - 1{,}18)^{0,34}}, t \leq 60min \quad (11)$$

$$i_{máx} = \frac{597{T_R}^{0,32}}{(t + 3)^{0,73}}, t > 60min \quad (12)$$

onde *i* é a intensidade máxima da chuva (mm.h^{-1}); *Tr* é o tempo de retorno da chuva de projeto (anos); e *t* é a duração (min).

Para determinar a distribuição da chuva no tempo, foi utilizado o quarto quartil de Huff (1967). Esse quartil foi escolhido porque o pico da chuva acontece no final da chuva, sendo assim a bacia recebe um grande volume de chuva após o solo já estar saturado (MONTEIRO e KOBIYAMA, 2014).

A duração da chuva foi definida com o intuído de gerar o maior pico de vazão possível. Para isso, utilizou-se o *Simplex Search Method* de Lagarias *et al*. (1998), onde a função objetivo foi o maior pico do hidrograma. Para simular o hidrograma, foi utilizado o filtro do escoamento de base da mesma forma que na validação. A discretização temporal da chuva de projeto foi de um minuto. Os períodos de retorno escolhidos para a verificação da duração crítica da chuva de projeto foram 5, 10, 20, 50, 100, 150, 200 e 300. Após calculado o hidrograma de projeto, utilizando a Equação 5, mutiplicaram-se as ordenadas do hidrograma pela área da bacia e ajustou-se a unidade de tempo para obter o valor de pico em m³/s. O volume foi feito por meio da integral numérica, utilizando a regra dos triângulos.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O esperado é que o pico aconteça no momento em que toda a bacia esteja contribuindo, isto é, que a chuva tenha no mínimo a duração do tempo de concentração da bacia. Na bacia trabalhada o tempo de concentração está entre 30 e 35 minutos (KOBIYAMA *et a*l., 2006). O tempo crítico da chuva de projeto variou de 80 a 110 minutos (Figura 2a), indicando que considerar apenas o tempo de concentração da bacia para definição da duração da chuva não garante que o hidrograma represente o pior cenário. Um fator que influencia isso é a abstração inicial, pois, no

modelo, a bacia só começará a responder a chuva quando o volume de abstração inicial for alcançado.

Na Figura 2b e na Figura 2c, observa-se que a taxa de variação da vazão de pico e do volume diminui conforme aumenta o tempo de retorno. Um dos fatores que pode influenciar para que isso aconteça é o valor do *Curve Number* da bacia, pois, para o modelo, quanto menor for o volume da chuva, maior será a influência do *Curve Number.*

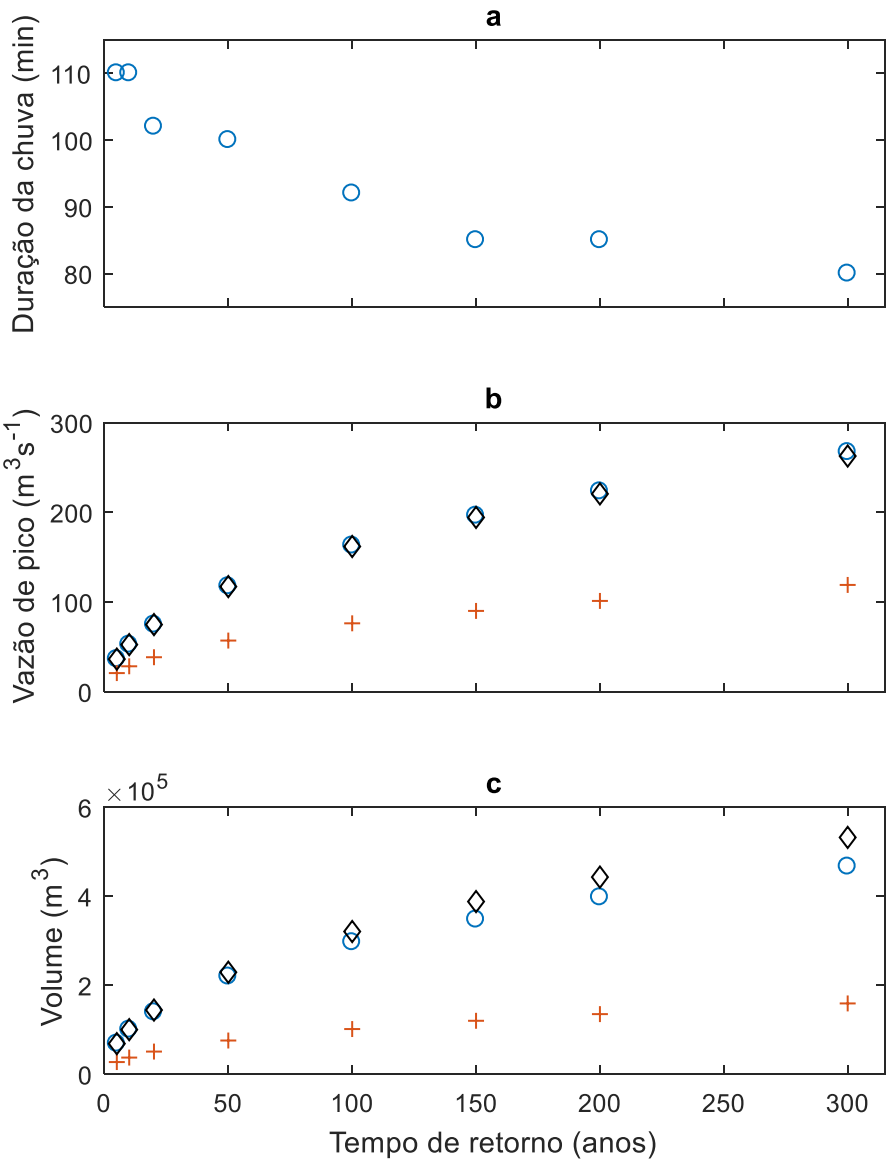

Figura 2 – Comportamento do hidrograma estimado a partir da chuva de projeto. O gráfico **a** mostra a duração da chuva em relação ao tempo de retorno que geraria o hidrograma com o maior pico; Em **b** e **c** os símbolos (o) indicam o comportamento do hidrograma quando utilizada a duração da chuva apresentada no primeiro gráfico, o símbolo (+) indica o comportamento do hidrograma quando utilizada a chuva com duração igual ao tempo de concentração e símbolo (◊) indica o comportamento do hidrograma quando utilizada a maior duração crítica encontrada pelo gráfico **a**.

Ainda, na Figura 2b e na Figura 2c, observa-se a importância da duração da chuva de projeto. Quando utilizada a duração da chuva de projeto como sendo igual ao tempo de concentração estimaram-se hidrogramas com picos subestimados. Essa diferença aumenta, sendo mais relevante conforme o tempo de retorno aumenta.

Mesmo que para períodos de retorno maiores o tempo de duração da chuva se aproxime mais do tempo de concentração, a diferença entre vazão de pico e volume escoado aumenta (Figura 3), chegando a subestimar 55% da vazão de pico para um hidrograma de projeto com tempo de retorno de 300 anos e 65% para do volume.

Quando considerado o tempo de duração como sendo 110 minutos, ou seja, o maior tempo crítico encontrado usando a metodologia apresentada, a subestimação do pico fica 1,6% para uma chuva de projeto com tempo de retorno de 300 anos (Figura 3a). O que mostra que, quando não se sabe o valor crítico da chuva de projeto, é preferível extrapolar a duração da chuva de projeto.

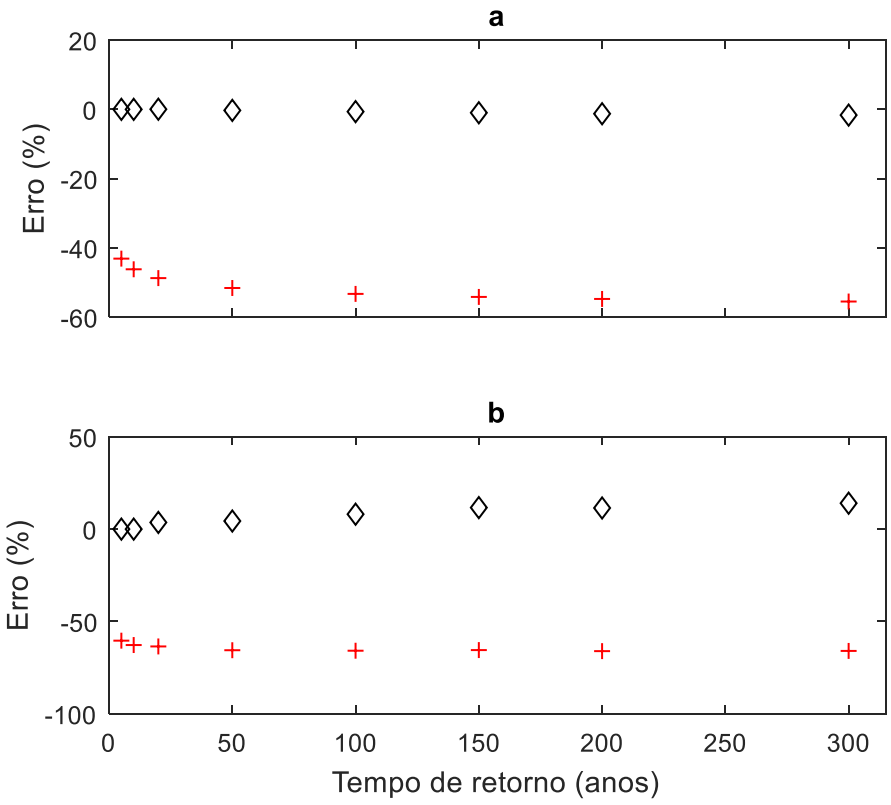

Figura 3 – a) Indica o erro da vazão de pico em relação ao hidrograma feito com a duração crítica do gráfico apresentado na Figura 2a; b) Indica o erro do volume em relação ao hidrograma feito com a duração crítica do gráfico apresentado na Figura 2a. Onde o símbolo (+) indica o comportamento do hidrograma, quando utilizada a chuva com duração igual ao tempo de concentração e o símbolo (◊) indica o comportamento do hidrograma, quando utilizada a maior duração crítica encontrada pelo gráfico da Figura 2a.

4 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a duração crítica da chuva de projeto para diversos tempos de retorno. A duração da chuva de projeto variou de 80 a 110 minutos, sendo maior do que o tempo de concentração da bacia hidrográfica (30 a 35 minutos). O pico e o volume do hidrograma estimado foram subestimados quando se utilizou o tempo de concentração da bacia hidrográfica em relação ao tempo crítico da duração da chuva de projeto encontrada pela metodologia aplicada. Isso mostra a importância de avaliar diferentes durações da chuva de projeto para que se possa estimar o cenário de uma inundação da maneira mais crítica possível.

5 - REFERÊNCIAS

ECKHARDT, K. (2005). "How to construct recursive digital filters for baseflow separation." *Hydrological Processes*, v. 19, n. 2, p. 507-515.

HUFF, F. A. (1967). *"Time distribution of rainfall in heavy storms." Water Resources Research*, v. 3, n. 4, p. 1007-1019.

KIRPICH, Z. P. (1940) "*Time of concentration of small agricultural watersheds."* Civil Engineering, v. 10, n. 6, p. 362.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F. ; LINO, J.F.; SILVA, R.V. (2006) Estimativa Morfométrica e Hidrológica do Tempo de Concentração na Bacia do Campus da UFSC, Florianópolis - SC. In: Anais I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste (1: 2006: Curitiba), Curitiba: UFPR, 11p.

LAGARIAS, J. C.; REEDS, J. A.; WRIGHT, M. H.; WRIGHT P. E. (1998). "*Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions*." SIAM Journal on optimization, v. 9, n. 1, p. 112-147.

MAIDMENT. D. R. (1993) "Handbook of Hydrology". McGraw Hill Professional,1424 p.

MOCKUS, V. (1957) "*Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application".* American Geophysical Union, Pacific Southwest Region, Sacramento, CA.

MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. (2014) "*Influência da distribuição temporal de precipitação no mapeamento de inundação". REGA v. 11, n. 2, p. 25-35.*

TUCCI, C. E. N. (2007) "Hidrologia: ciência e aplicação". Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4, 943 p.