

Estimativa da vazão máxima e hidrograma de projeto em pequenas bacias

Estimative of design hydrograph in small basins

Carlos Eduardo Morelli Tucci¹ 

¹Rhama Consultoria Ambiental, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: carlos.tucci@rhama-analysis.com.br

Como citar: Tucci, C. E. M. (2025). Estimativa da vazão máxima e hidrograma de projeto em pequenas bacias. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 22, e12. <https://doi.org/10.21168/rega.v22e12>

RESUMO: A estimativa da vazão máxima e do hidrograma de projeto para bacias pequenas¹ (< 2.000 km²), é um desafio devido à falta de dados observados de vazão. O modelo usualmente utilizado neste caso é o NRSCS, onde um dos principais parâmetros é o CN, que estima a quantidade de água superficial na bacia a partir da precipitação. O valor de CN é estimado com base no uso e tipo de solo, mas traz consigo muitas incertezas devido a subjetividade da escolha do parâmetro CN. Este artigo apresenta uma metodologia que utiliza a vazão máxima média diária para um tempo de retorno T, obtida por regionalização das vazões máximas médias diárias observadas na região e a precipitação sobre a bacia e sua distribuição no tempo, com o mesmo tempo de retorno, para estimar o parâmetro CN. Este procedimento, ao usar dados observados, minimiza as incertezas da estimativa do CN. Esta metodologia foi aplicada na bacia do rio Camboriú (SC) com área de drenagem de 128 km² e tempo de concentração de 7h. A vazão máxima média diária para cada tempo de retorno T foi obtida pela regionalização pelo método *Index Flood* (Natural Environment Research Council) com base nos dados medidos de vazão da região. A Precipitação com o mesmo risco T foi determinada com dados observados da região. O valor de CN foi obtido considerando diferentes tempos de retorno. Este resultado foi comparado com o procedimento convencional, onde o CN é obtido pelas tabelas da literatura e pelo método que combina regionalização e método de Fuller para a vazão máxima instantânea. O resultado obtido com o método proposto apresentou resultado maior que os demais e tende a ser mais confiável, já que se baseia em dados de vazão da região.

Palavras-chave: Hidrograma de Cheia; Regionalização; Falta de Vazões Medidas.

ABSTRACT: The estimation of the design hydrograph for small basins (< 2,000 km²) is a challenge due to the lack of record flow data. The model usually used in this case is the NRSCS, where one of the main parameters is the CN, which estimates the amount of surface water in the basin based on the rainfall. The CN value is estimated based on land use and type, but it brings many uncertainties due to the subjectivity of the choice of the CN parameter, leading to uncertainties in the estimated flows. The proposed procedure uses the maximum average daily flow for the chosen risk of return time T, obtained by regionalization of the maximum flows recorded in the region, and the precipitation with the same risk, to estimate the CN, seeking to minimize the uncertainties of its estimative. This methodology was applied in the Camboriú River Basin (SC) with a drainage area of 128 km² and a concentration time of 7 hours. The maximum average daily flow for each return time was obtained by regionalization by the Index Flood method (Natural Environment Research Council) based on the data measured from the region. The estimated CN was obtained for a few return periods. The maximum flow were obtained by the proposed method, the conventional procedure, where the CN is obtained by reference tables based on its land use and the method which uses regionalization flow and Fuller equation. The result obtained with the proposed method presented greater flow and it is more reliable, since it is based on recorded flow from the region.

Keywords: Flood Hydrograph; Regionalization; Lack of Flow Recorded Data.

INTRODUÇÃO

O hidrograma de projeto é a variação da vazão no tempo para um tempo de retorno e representa a combinação da vazão máxima com o volume do hidrograma para o tempo de retorno. Existem muitas obras hidráulicas, na infraestrutura de transporte, energia, mineração, áreas urbanas e rurais como: bueiros, condutos, canais, vertedouros de reservatórios e travessia de pontes, entre outras, que são

¹ A denominação de bacia pequena foi realizada aqui para caracterizar bacias com tempo de concentração abaixo de 24 h e existem dados limitados de vazão no Brasil (< 2000 km²). A base de dados foi criada no século 20 pelo antigo DNAEE com a visão de produção de energia elétrica, que geralmente usam bacias maiores que esta área de drenagem.



dimensionadas com base no hidrograma/vazão máxima com um tempo de retorno. As bacias hidrográficas destes subsistemas frequentemente possuem pequena área de drenagem e não existem dados de vazão para dimensionar estas obras. O total de investimento anual no setor de obras hidráulicas é elevado e o dimensionamento pode levar ao sub ou superdimensionamento devido à falta destes dados (Młyński et al., 2018)

A base de dados hidrológicos no Brasil, disponibilizada pela ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), apresenta os dados diários de vazão, obtidos com base na média de duas leituras diárias de níveis (7h e 17h) e uso da curva-chave dos postos fluviométricos. Os dados com intervalo de tempo menor, podem ser obtidos dos postos com linígrafo ou telemétrico, mas são poucos nas bacias brasileiras. Quando existem somente dados diários, a vazão máxima não pode ser obtida dos valores diários, já que existirá sempre uma diferença entre a vazão máxima diária da vazão máxima instantânea (maior observada no dia). A diferença entre estas variáveis varia com o tempo de concentração da bacia e/ou área da bacia, além da intensidade e duração da chuva. A diferença diminui com o aumento da área da bacia, sendo menor quando as bacias são maiores que 2.000 km² (Silva & Tucci, 1998).

Para as bacias com área inferior a 50 km², praticamente não existem dados fluviométricos no Brasil. As metodologias utilizadas se baseiam na precipitação máxima e sua distribuição temporal e espacial para um determinado tempo de retorno. Os métodos usuais são: o Método Racional para áreas menores que 8 km² (Tucci, 1993) e o Modelo NRCS (U.S. Department of Agriculture, 1975) para bacias com área maior que 8 km². Neste âmbito, estão grande parte de bacias urbanas, bacias de reservatórios de mineração, e parte da infraestrutura de estradas. No cenário onde é necessário o hidrograma e a vazão máxima para um determinado tempo de retorno, o modelo frequentemente usado é o NRSC.

Para bacias com área superior a 50 km², onde existem dados de postos fluviométricos na região, mas não existem dados no local de interesse, as incertezas podem ser altas (Duan et al., 2006). As metodologias para estimativa do hidrograma de projeto numa bacia sem dados são (Eletrobras, 2000): (a) Modelo Precipitação-Vazão: simula a transformação de precipitação em vazão, com o risco obtido sobre a magnitude e distribuição temporal e espacial da precipitação. Neste caso o modelo usualmente utilizado é o NRSC (U.S. Department of Agriculture, 1975) porque seus parâmetros podem ser estimados sem dados de vazão; ou (b) Regionalização hidrológica com base em dados de vazão medidos na região permite estimar disponíveis a vazão máxima em locais sem dados (apenas a vazão máxima diária, sem o hidrograma²) e uma equação empírica que relaciona vazão máxima diária e vazão máxima instantânea (Samuel et al., 2011; Brunner et al., 2018). A principal incerteza no primeiro método é a subjetividade da estimativa dos parâmetros do modelo, que podem produzir importantes incertezas nas vazões, destacando-se o valor de CN (modelo NRSC), que influencia na determinação do volume de escoamento superficial da bacia (Duran-Barroso et al., 2017). No segundo método, a incerteza é de obter a vazão máxima instantânea com base na vazão máxima média diária pelo uso de equações empíricas, e não permite a estimativa do hidrograma. Sui (2005) combinou a regionalização de vazão máxima da bacia com o uso do modelo Hidrológico HEC1, que reproduz o modelo NRSC, e ajustou o valor do CN para determinar o hidrograma e a vazão máxima.

O objetivo deste artigo é o de apresentar a metodologia que, combina os métodos citados acima para determinação do parâmetro CN de forma direta, com base em dados de vazão máxima diária, evitando as incertezas e subjetividade das tabelas e interpretação do tipo e uso do solo, para determinar a vazão máxima instantânea e o hidrograma de projeto.

MÉTODOS DE ESTIMATIVA DO HIDROGRAMA

A seguir, são apresentados os dois métodos citados no item anterior e o método proposto neste artigo, que combina os mesmos.

Método Chuva-Vazão

A Precipitação máxima no tempo t , para um tempo de Retorno T é representado pela função $P_{mx}(t, T)$. Usando um modelo hidrológico que transforma precipitação em vazão, é determinado o hidrograma com o tempo de retorno T , $Q_{mx}(t, T)$. Este procedimento considera que precipitação produz o hidrograma com o mesmo tempo de retorno T , o que não é necessariamente verdade, devido às diferentes condições relacionadas com a distribuição temporal e espacial da chuva, umidade antecedente do solo e parametrização do modelo. O modelo NRCS (U.S. Department of Agriculture,

² O hidrograma combina vazão máxima e volume é usado para dimensionamento que envolve o projeto de reservatório e seu extravasor.

1975) possui dois parâmetros: o CN que determina a chuva efetiva, e o t_c , que é o tempo de concentração da bacia, no qual é baseada a propagação superficial do escoamento. Além disso, depende das condições iniciais de umidade para estabelecer o CN (Brandão et al., 2025). Este modelo é mais utilizado porque o parâmetro CN pode ser determinado com base no tipo e uso do solo de tabelas (U.S. Department of Agriculture, 1975) e o tempo de concentração, com base nas características físicas das bacias por várias equações (Tucci, 2007). Vários autores têm explorado as condições iniciais de umidade para definição do valor do CN (Brandão et al., 2025).

As limitações desta metodologia são: (a) os critérios de variabilidade temporal e espacial da chuva e a umidade antecedente podem gerar grande variação de resultados; (b) Como não existem dados fluviométricos, os parâmetros não são ajustados e a incerteza é alta, tendendo a resultados conservadores. A vantagem deste método é a determinação do hidrograma de projeto associado à vazão máxima instantânea para locais sem dados.

Tucci (1998) analisou as incertezas deste modelo. Considerou a distribuição temporal da chuva com base no método de Chicago (Keifer & Chu, 1957), tendo como parâmetro o γ e considerou uma distribuição uniforme entre 0 e 1 para o γ . A incerteza do CN foi obtida a partir de 15 eventos observados de precipitação e vazão, onde se obteve 15 valores de CN (fixando a perda inicial) e foi ajustada uma distribuição de probabilidade empírica para esta amostra. Utilizando o método de Monte Carlo, com a geração de muitos valores aleatórios e os valores de γ e CN, obteve-se a vazão máxima para um tempo de retorno, com um intervalo de confiança. Os valores esperados para cada risco foram comparados com a distribuição empírica de probabilidade das vazões observadas. Os resultados mostram grande proximidade entre o valor esperado com os valores observados. Este resultado mostra que o CN pode ser obtido com base em dados observados de eventos de uma determinada bacia.

Regionalização Hidrológica

A regionalização hidrológica permite estimar a vazão máxima média diária, $Q_{md}(T)$ para uma bacia sem monitoramento hidrológico, com base nos dados dos postos fluviométricos da região. A regionalização pode ser realizada por (a) regressão dos valores máximos de vazão para um tempo de retorno em função da área de drenagem e outras características físicas da bacia estatisticamente relevantes; (b) Método *Index Flood* regionaliza uma curva adimensional de probabilidade e a regressão da variável de adimensionalização (vazão média de cheia) (Natural Environment Research Council, 1975). Este último método é mais apropriado para o Brasil, onde o número de anos das séries é muito variável.

Para obter a vazão máxima instantânea Q_{mi} é usada uma relação empírica entre vazão Q_{mi} e a vazão máxima média diária (Q_{md}) do tipo:

$$Q_{mi}/Q_{md} = 1 + a \cdot A^b \quad (1)$$

onde a e b são ajustados aos dados de uma região e A é área em km^2 . Fuller (1914) obteve para o Leste dos Estados Unidos $a=2,66$ e $b=-0,3$; Silva e Tucci (1998) obtiveram para o Sul do Brasil $a=15,03$ e $b=-0,053$ e Correia (1983) para Portugal $a= 1,20$ e $b= 0,036$. Esta regressão também pode usar outras variáveis físicas e climáticas da bacia (Ellis & Gray, 1966; Canuti & Moissello, 1982; Taguas et al., 2008). A equação de Fuller tem sido a mais usada, mas estas equações podem apresentar grande variação fora da região que foram determinadas.

Quando no local existem dados de vazão diária é possível determinar a vazão máxima instantânea com base nos dados métodos como os apresentados por Langbein (1949), Sangal (1983), Fill & Steiner (2003) e Chen et al. (2017).

As limitações desta metodologia são as seguintes: (a) determina a vazão máxima instantânea, mas não determina o hidrograma; (b) incerteza na determinação da vazão máxima instantânea pela equação empírica; (c) não pode ser usado se a regressão da regionalização não abranger dados com bacias do tamanho de onde será utilizado. A vantagem desta metodologia é o uso de dados observados da região.

Método Proposto

A metodologia proposta possui as seguintes etapas: (1) regionalização da vazão máxima média diária para determinação de $Q_{md}(T)$; (2) Determinação do valor de CN com base na vazão máxima média diária regionalizada; (3) Determinação da vazão máxima e o hidrograma de projeto $Q(t,T)$, com base na precipitação de tempo de retorno T , utilizando o valor de CN estimado. Neste método é reduzida a incerteza de CN, que é o parâmetro mais sensível.

Regionalização da vazão máxima diária, $Q_{md}(T)$ - O Método *Index Flood* permite melhor ajustar dados de vazão com postos com grande variação de período de dados (Natural Environment Research Council, 1975; Tucci, 1993). O método possui duas etapas: adimensionalização das curvas de probabilidades e a regressão da variável de adimensionalização, que é a vazão média de cheia (Q_{mc}):

Adimensionalização da curva de probabilidade de vazão máxima com base na vazão média de cheia Q_{mc} é expressa por

$$\left[\frac{Q_{md}(t)}{Q_{mc}}\right]_i = F(T) \quad (2)$$

onde $Q_{md}(T)$ é a vazão máxima diária para um tempo de retorno T ; i é a identificação do posto i .

Todos os postos da região têm sua curva adimensionalizada. Na sequência, é determinada a curva média regional pelo ajuste das curvas individuais a uma curva regional, resultando

$$\left[\frac{Q_{md}(T)}{Q_{mc}}\right]_r = F(T) \quad (3)$$

Regionalização da vazão média de cheia Q_{mc} com base em características físicas da bacia:

$$Q_{mc} = G(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n) \quad (4)$$

onde $G(\cdot)$ é a função; $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ são os indicadores que permitem determinar Q_{mc} a vazão máxima média de cheia, como área de drenagem (A), Precipitação (P), entre outros.

A vazão com um determinado tempo de retorno é obtida para um determinado local A sem dados, pela combinação das Equações 3 e 4, obtendo-se

$$Q_{md}(A, T) = \left[\frac{Q_{md}(T)}{Q_{mc}}\right]_r \cdot Q_{md}(A) \quad (5)$$

A vazão assim obtida é a vazão máxima média diária para o tempo de retorno T na bacia A .

Estimativa do CN com base na vazão máxima média diária (Q_{md}) - O procedimento adotado utiliza a vazão máxima média diária para um determinado tempo de retorno, obtida da regionalização para estimar o valor do CN. O critério adotado nesta metodologia é que o volume do hidrograma com tempo de retorno (T), em mm, $[Q_{md}(T)]_h$, é igual a vazão máxima média diária $[Q_{md}(T)]_r$ obtida da regionalização de vazões em mm, ou seja

$$Q_{md}(T)_r = Q_{md}(T)_h \quad (6)$$

Este critério se baseia em que o volume total da chuva do hidrograma escoou dentro do período de 24 h, depois de iniciada a chuva. Neste resultado, despreza-se o escoamento subterrâneo, já que as vazões máximas apresentam um volume significativo com relação ao escoamento subterrâneo. Esta hipótese é usada para hidrogramas de escoamento superficial, que ocorrem durante um período de cerca de 24 horas. Limitações podem ocorrer em bacias em que o escoamento subterrâneo é muito relevante, fazendo com que o hidrograma tenha uma duração muito longa. Para estes cenários, pode-se separar o escoamento superficial do subterrâneo, já que o modelo NRSCS representa o escoamento superficial.

Utilizando a equação do modelo NRCS para determinação da vazão, em mm (U.S. Department of Agriculture, 1975):

$$Q = \frac{(P-\alpha)^2}{P+S-\alpha} \quad (7)$$

onde P é a precipitação em mm, S é o armazenamento em mm e Q é a chuva efetiva (escoamento superficial) em mm e α são as perdas iniciais. Em condições médias é estimado como $\alpha = 0,2S$. S é obtido em função do CN por

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (8)$$

onde CN é o parâmetro do modelo determinado com base no tipo e uso do solo.

Considerando que o volume do hidrograma de vazão máxima para o tempo de retorno escolhido T é obtido pela vazão máxima média diária da regionalização, substituindo a Equação 6 fica

$$Q = k \frac{Q_{md}(T)_r}{A} \quad (9)$$

onde Q é a chuva efetiva acumulada, em mm/24h. No final do evento, este valor representa o volume do hidrograma; $Q_{md}(T)_r$ que é a vazão máxima média obtida da regionalização em m^3/s para o evento, A é a área da bacia em km^2 e k é o fator de conversão de unidades = 86,4 (m^3/s para mm/24h)

Substituindo a Equação 9 na Equação 7 com a precipitação $P(T)$ da chuva total de 24 h máxima, a única incógnita é o valor de S e, em consequência, o valor de CN (Equação 8). Existirão dois valores de CN , mas somente um é verdadeiro e real. Este procedimento permite estimar o valor de CN médio para a bacia, compatibilizando o volume do hidrograma obtido a partir da chuva com a vazão máxima média diária para o tempo de retorno T , obtida da regionalização de vazão. Na Equação 7 foi considerada uma perda inicial média (0,2S) adotada no modelo, mas pode-se explorar nesta metodologia o valor da perda inicial.

Chuva-Vazão - O hidrograma de projeto se baseia na precipitação para um tempo de retorno T , $P(T)$ e no uso de um modelo chuva-vazão. Foi utilizado o modelo NRCS (U.S. Department of Agriculture, 1975), incorporado ao modelo HEC-HMS (Hydrologic Modeling System, desenvolvido por Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers). A metodologia possui as seguintes etapas: (a) precipitação para um tempo de retorno T , com base numa IDF (intensidade Duração e Frequência da chuva) e a sua distribuição temporal e espacial; (b) Estimativa de CN ; (c) Simulação do escoamento superficial com hidrograma unitário triangular com base na estimativa do tempo de concentração t_c .

Precipitação de Projeto: A precipitação máxima é estabelecida para um determinado tempo de retorno, com base na curva IDF observada ou obtida por transferência de outros locais (Taborga, 1974; Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 1979). A precipitação máxima espacial é determinada com base em método de abatimento de acordo com a relação Precipitação – Duração – Área. Esta função pode ser determinada por isoietas de evento crítico ou com base em fatores obtidos na literatura (Raudikivi, 1979).

A distribuição temporal da precipitação é determinada para uma duração superior ao tempo de concentração, maximizando a sua distribuição para um quartil escolhido. A definição da duração é importante para minimizar a incerteza das condições iniciais. Fleischmann et al. (2019) mostraram a diferença de simulação de eventos e séries contínuas para determinação da vazão máxima e do hidrograma.

Chuva Efetiva – A chuva efetiva é obtida com base no parâmetro CN e a condição inicial de umidade. O valor de CN para as subbacias são obtidas com base em tabelas apresentadas em U.S. Department of Agriculture (1975) que consideram o tipo e uso do solo. A Agência Nacional de Águas (2018) publicou um atlas com valores de CN para o Brasil que pode ser utilizado como base para sua estimativa.

Propagação do escoamento superficial – a chuva efetiva é propagada por um hidrograma triangular construído com base no t_c . O tempo de concentração pode ser estimado por equações empíricas ou pelos métodos que usam informações de geoprocessamento para estimar a velocidade do escoamento na bacia e seu tempo de deslocamento. O hidrograma para o tempo de retorno T , $Q(t,T)$ é obtido para a $P(t,T)$ aplicada no modelo NRSC, resultando numa vazão máxima instantânea e um hidrograma com seu volume.

Propagação em rios e canais e reservatórios – para representar o escoamento em trechos de rios usualmente é utilizado o método de Muskingum ou hidrodinâmico e para reservatórios o método de Puls, quando a bacia necessita desta discretização (Tucci, 1993). São modelos que permitem a estimativa dos seus parâmetros com base nas características físicas dos sistemas.

RESULTADOS

Bacia do rio Camboriú

Na bacia não existem dados hidrológicos para determinar o hidrograma de projeto para avaliar o amortecimento de inundação numa área a montante da cidade de Camboriú no estado de Santa Catarina, Brasil. O rio escoar para o Oceano Atlântico e a bacia possui uma área de drenagem de 128 km^2 no local de interesse, à montante da cidade, onde existe espaço para um reservatório de amortecimento (Figura 1).

A bacia à montante apresenta relevo da Serra do Mar, onde o rio escoar para uma planície litorânea. O uso do solo à montante é de pasto e irrigação de arroz e, a jusante, de áreas urbanas próximas ao litoral. O rio Camboriú é formado pelo rio do Braço e Tijucas que depois da confluência é chamado de rio Camboriú (Figura 1) no estado de Santa Catarina. A seção de interesse se localiza a montante da entrada no rio no mar e a montante das áreas urbanas. A bacia foi subdividida em três subbacias: rio do Braço (51,13 km²), rio Tijucas (74,43 km²) e Camboriú ou Bacia do Parque (2,44 km²) que é a bacia entre a confluência e a seção de interesse junto a área de amortecimento (Figura 1). Na Tabela 1 são apresentadas as características físicas das bacias: área de drenagem, comprimento do rio principal, desnível obtidas do ANADEM é um Modelo Digital do Terreno (MDT) (Laipelt et al., 2024) e tempo de concentração obtido a partir da equação California Culverts Practice (Porto et al., 1993). Esta equação é a seguinte:

$$t_c = 57L^{1,155} \cdot H^{-0,385}$$

onde t_c é tempo de concentração obtido em minutos; L é o comprimento em km, e H o desnível em m.

O uso e tipo do solo foram obtidos com base em Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (1999). Os valores de CN foram determinados com base na tabela de SCS (U.S. Department of Agriculture, 1975), utilizando estas informações $t_c = 57 L^{1,155} \cdot H^{-0,385}$

Tabela 1. Características dos parâmetros do modelo.

Bacia	Área de drenagem km ²	Comprimento do rio km	Desnível m	Tempo de concentração Min	Uso do Solo na bacia	CN
Bacia do rio do Braço	51,13	21,46	45	454,4	florestas (50%) + plantações (50%)	68,0
Bacia do rio Tijucas	74,43	16,76	24	435,0	florestas (40%) + plantações (40%) + campos (20%)	66,0
Bacia para o Parque	2,42	0,75	3	26,8	florestas (30%) + plantações (70%)	71,2
Total	127,98	22,21	453	881,2		66,9

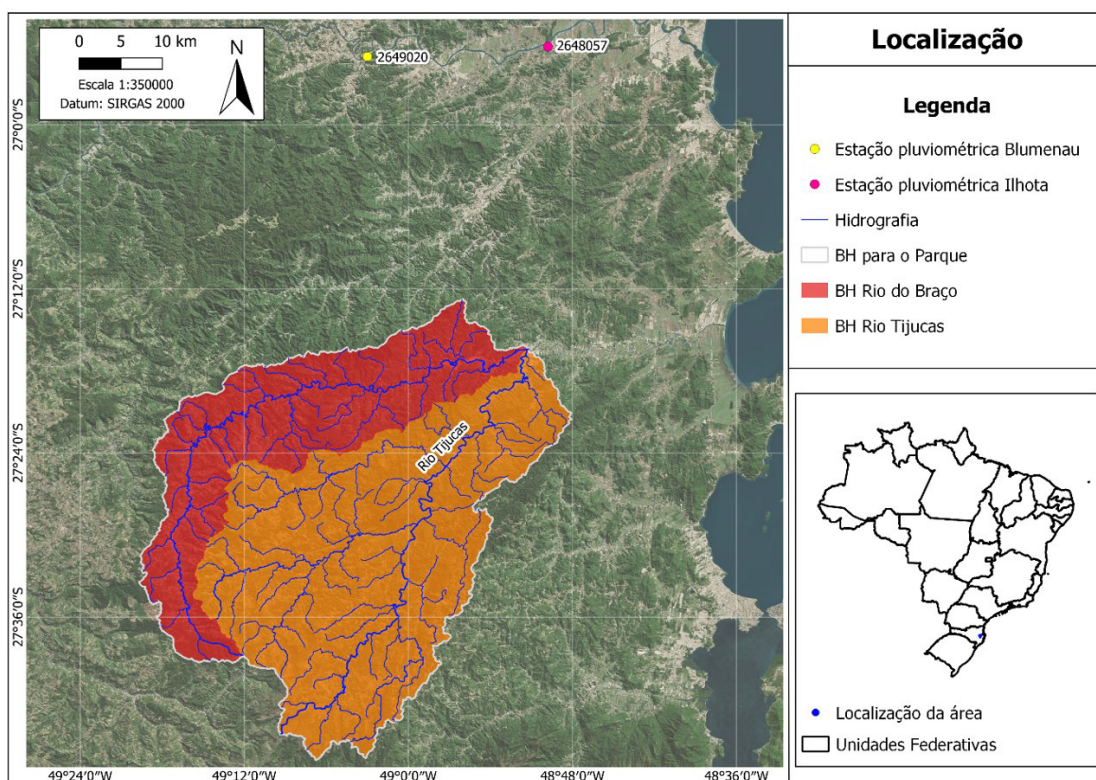


Figura 1. Bacia do rio Camboriú.

Hidrograma de projeto: método NRSC

Para determinar o hidrograma de projeto foram estimados: (a) a precipitação de projeto, a partir da chuva máxima pontual de um posto da região e sua distribuição temporal e espacial para a bacia; (b) Chuva efetiva obtida com base no CN para cada subbacia e características do tipo e uso do solo e; (c) propagação da chuva efetiva pelo hidrograma triangular.

Precipitação máxima de 1 dia de duração: Com base nas precipitações máximas do posto de Ilhota foi ajustada a distribuição log Pearson III. Na bacia não existe um posto pluviométrico com série histórica longa e foi escolhido um posto próximo com série longa (Figura 1). Na Figura 2 é apresentado o ajuste da distribuição de probabilidades às precipitações máximas.

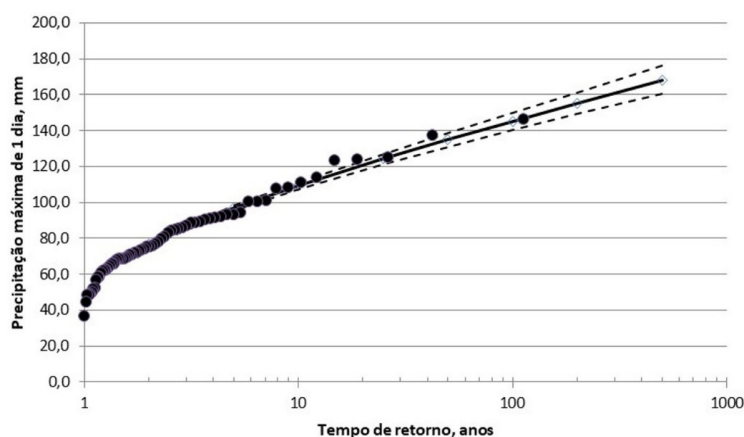


Figura 2. Ajuste da distribuição Log Pearson III aos dados de precipitação de 1 dia de Ilhota com valores esperados e banda de confiança para 95%.

IDF com base no posto em estudo: Para a determinação da precipitação máxima para os mesmos tempos de retorno com duração inferior a 1d foi utilizado o método da proporção das durações (Bell, 1969 ; Tucci, 1993). A precipitação para uma duração d, e tempo de retorno T é obtida pela equação seguinte:

$$P(T, D) = P(T, 1\text{dia}) \cdot F_k \quad (10)$$

Os valores de F_k foram obtidos com base no posto de Blumenau. Este é o posto mais próximo da bacia que possui uma curva de intensidade-duração-frequência. Usando as mesmas proporções de durações deste posto os resultados são mais próximos das proporções de durações médias do Brasil (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 1979). Com base nesta metodologia foram determinadas as precipitações para durações e tempos de retorno para a bacia de interesse.

Distribuição espacial da precipitação: As precipitações máximas de um posto representam o valor pontual, não um evento contínuo ou distribuído. Quando ocorre um evento chuvoso, o máximo pontual tem uma redução espacial, já que não chove o máximo em toda a bacia. Desta forma, para calcular o redutor espacial de um evento máximo utilizou-se os fatores de redução de área baseado na curva apresentada pelo US Weather Bureau (Raudikivi, 1979) baseado na área da bacia hidrográfica em estudo. Na Tabela 2, são apresentadas as precipitações máximas para a bacia hidrográfica.

Hietograma de Projeto: Para determinar o hietograma de projeto utilizou-se a duração da tormenta para 24 h, considerando a importância do efeito do volume na simulação do controle da inundação. O período de 24 h é pelo menos 4 vezes o tempo de concentração da bacia em estudo, o que permite melhor definir as condições iniciais da chuva projeto.

Para determinar a chuva de projeto adotou-se o critério dos blocos alternados (Tucci, 1993) para o terceiro quartil com o máximo intervalo de chuva na hora 16 e valores decrescentes alternados distribuídos antes e depois da precipitação máxima.

Parâmetros do Modelo Hidrológico - Inicialmente para simular o procedimento usual, a bacia foi subdividida em 3 subbacias (Figura 1). As características de cada sub-bacia são apresentadas na Tabela 1, juntamente com a estimativa inicial dos parâmetros CN obtidas das tabelas no modelo e o tempo de concentração.

Hidrograma - Para simular o hidrograma utilizou-se o modelo NRCS para cada sub-bacia, as vazões das três bacias nos tempos devido foram somadas devido a proximidade entre a saída das bacias do rio do Braço e do rio Canoas com a bacia do Parque junto ao rio Camboriú. Foram obtidos os hidrogramas para os tempos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100, 200 e 500 anos. Estes resultados representam os hidrogramas obtidos para os cenários de estimativa com base nos valores da tabela de CN.

Tabela 2. Precipitações máximas sobre a bacia.

T	Tempo de Retorno em anos									
Hora	2	10	25	50	100	200	500	1000	2000	10000
1	22,4	31,9	36,3	39,4	42,4	45,3	49,2	52,0	54,9	61,5
2	30,0	42,7	48,5	52,7	56,7	60,6	65,8	69,6	73,4	82,2
4	39,8	56,7	64,4	70,0	75,3	80,5	87,3	92,4	97,5	109,2
6	48,5	69,0	78,4	85,2	91,6	98,0	106,3	112,5	118,7	132,9
8	53,3	75,9	86,2	93,6	100,7	107,7	116,8	123,6	130,4	146,1
10	57,4	81,8	92,9	100,9	108,6	116,1	125,9	133,3	140,6	157,4
12	60,3	85,8	97,5	105,9	113,9	121,9	132,2	139,9	147,6	165,3
14	62,6	89,2	101,3	110,1	118,4	126,6	137,3	145,3	153,3	171,7
24	66,2	94,2	107,0	116,3	125,1	133,8	145,1	153,5	162,0	181,4
1d	74,3	105,8	120,3	130,6	140,5	150,3	163,0	172,5	182,0	203,8

Hidrograma de Projeto método proposto

Na bacia hidrográfica não existem dados observados de vazão, mas na região (bacias vizinhas, como a do rio Itajaí) existem vários postos com dados pluviométricos e fluviométricos. Na região, foram selecionados 17 postos fluviométricos, com séries históricas variando de 33 a 77 anos. O posto pluviométrico com a série mais longa na região e representativo para a bacia do rio Camboriú é o posto de Ilhota, com série de mais de 70 anos de dados efetivos de precipitação máxima diária.

Regionalização de vazões - Na Figura 3 são apresentadas as curvas adimensionais dos postos fluviométricos e a curva média ajustada aos valores. A dispersão superior é esperada, devido não uniformidade do tamanho das séries. Tucci (1993) mostrou que preenchendo as séries curtas e regionalizando a dispersão diminui, mas o resultado da curva média é o mesmo.

Utilizando os valores de vazão média de cheia e a área da bacia dos postos foi determinado o ajuste por regressão entre estas variáveis, obtendo-se a seguinte equação:

$$Q_{mc} = 0,6251 \cdot A^{0,876} \quad (11)$$

onde Q_{mc} é a vazão média de cheia em m^3/s , A é a área de drenagem em km^2 . O coeficiente de determinação é de 0,97. Na Figura 4 é apresentado o ajuste da equação aos dados. As vazões máximas foram obtidas para a bacia em estudo são apresentados na Tabela 3. Estes valores representam as vazões máximas diárias $Q_{md}(T)$.

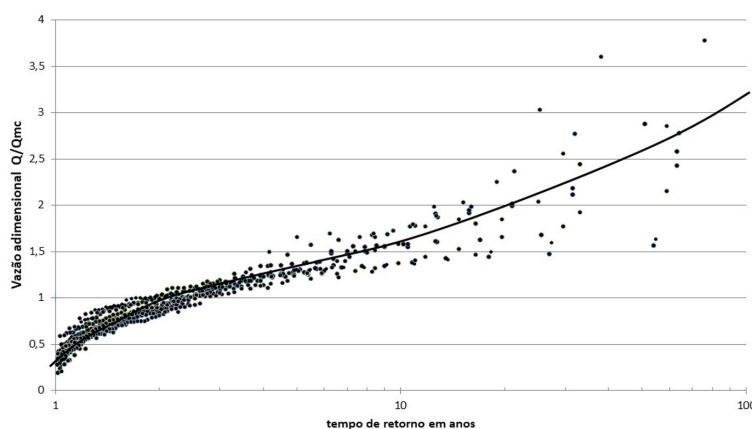


Figura 3. Curva adimensional de probabilidade com postos da região.

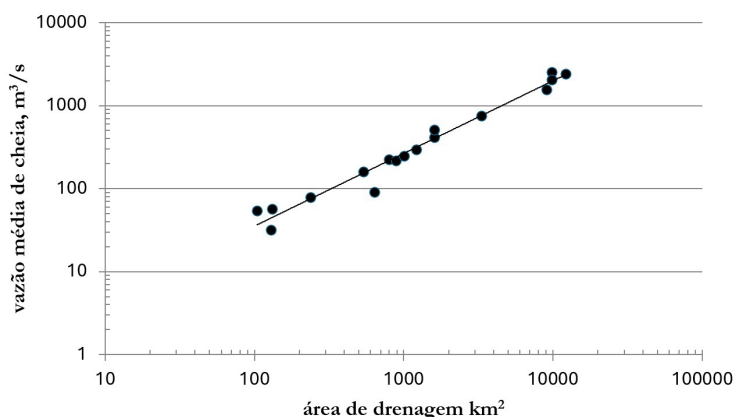


Figura 4. Ajuste da regressão na relação entre vazão média de cheia e a área da bacia para os postos da região.

Tabela 3. Vazões máximas para a bacia do rio Camboriú no local de interesse com base na regionalização.

T (Anos)	Q (m ³ /s)
2	43,8
5	56,94
10	70,08
25	78,84
50	87,6
100	96,36
200	113,88
500	142,35

Determinação dos Valores de CN com base na regionalização - Na metodologia descrita acima, foi considerado que o volume resultante da vazão média máxima diária corresponde ao volume do hidrograma que ecoa durante 24 horas na bacia (Equação 6). Com base neste conceito foi determinada a Equação 9 que em combinação com a Equação 7 e 8 permite determinar o valor de CN. Estes resultados podem estar influenciados pelo horário de início da chuva durante os diferentes eventos, que permitiram determinar os dados observados de vazão máxima média diária ao longo dos anos e usadas na regionalização. Estes dados são registrados as 7h e 17 h do dia e os eventos de cheia iniciam em horários aleatórios, portanto, a dúvida é se os dados observados representam o volume do evento.

Para analisar o efeito da aleatoriedade do início do hidrograma da cheia num dia, utilizou-se o método de Monte Carlo para geração de números aleatórios igualmente prováveis da hora de início da chuva do hidrograma (variável aleatória). Foi considerado que entre 1 e 24 h do dia todos tinham a mesma probabilidade de ocorrer. Para cada horário gerado foi determinada a vazão às 7 e às 17 h e obtida a média. Foram utilizados os hidrogramas obtidos para cada tempo de retorno. Foram gerados 1000 hidrogramas e determinadas as vazões médias para cada tempo de retorno. A média destes valores para cada tempo de retorno representa uma estimativa do volume diário do hidrograma, considerando o universo das incertezas deste processo.

Na Figura 5, são comparados os volumes obtidos pela simples média de todos os valores de vazão do hidrograma com o volume obtido pela análise de incerteza do início das chuvas dentro do dia e a partir das vazões estimadas às 7 e 17 h do dia. Pode-se observar, para diferentes períodos de retorno, que a média do hidrograma de 24h é praticamente igual ao valor médio das vazões estimadas às 7 e 17 h. Portanto, pode-se usar a vazão máxima diária obtida dos postos e depois da regionalização na igualdade da Equação 6.

Ajuste do parâmetro CN às vazões máximas médias diárias regionais - Na Tabela 4 são apresentados os valores de vazão média máxima diária obtida da regionalização (coluna 3), e estes mesmos valores transformados em deflúvio (mm/24h), na coluna 4. A partir das Equações 7, 8 e 9 determinou-se os valores de CN apresentados na coluna 6. Os valores variaram de 71,4 a 79,5. O valor adotado para o CN foi de 74,6 média dos tempos de retorno 2 a 200 anos. Dependendo do objetivo do estudo pode-se escolher o valor do CN de acordo com o tempo de retorno desejado, já que estes resultados representam incertezas amostrais da metodologia.

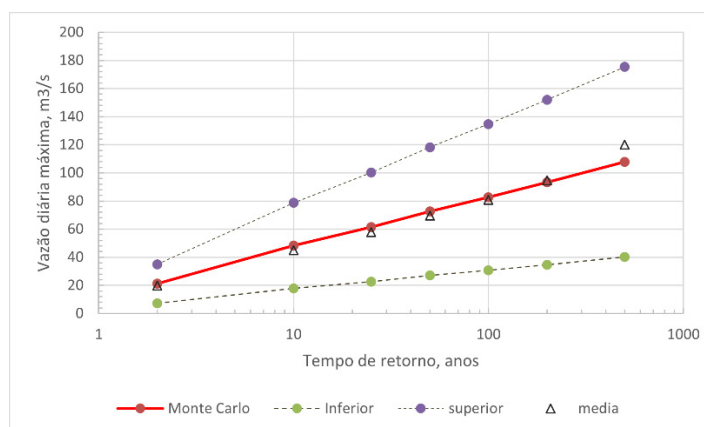


Figura 5. Comparação entre vazão média do hidrograma resultante da chuva com um tempo de retorno e a obtida pela variação do início da chuva dentro de 24 h e a observação as 7 h e 17 h, com seus intervalos inferior e superior da banda de confiança de 95%.

Tabela 4. Estimativa dos valores de CN com base na vazão máxima diária com base nos valores da regionalização.

Tempo de retorno (anos)	Precipitação Máxima (P) (mm/24h)	Vazão máxima diária da regionalização ¹ (m³/s)	Vazão máxima diária (Q) (mm/24h)	Coefficiente de escoamento ³ C	CN ² Estimado
2	74,3	43,8	29,57	0,398	79,5
10	105,8	70,08	47,30	0,447	76,2
25	120,3	78,8	53,19	0,442	73,2
50	130,6	87,6	59,13	0,453	72,3
100	140,5	96,4	65,07	0,463	71,4
200	150,3	113,9	76,88	0,512	73,1
500	163	142,4	96,12	0,590	76,4

¹ $Q_{má}(T)_r$; ²obtido pelas Equações 7, 8 e 9; ³o coeficiente de escoamento é a relação entre vazão e precipitação e permite avaliar quanto da chuva gera escoamento.

Vazão Máxima Média Diária

Na Figura 6 são apresentados os resultados dos valores de CN obtidos pelo método proposto para cada tempo de retorno e o resultado obtido para o CN médio (74,6). Pode-se observar que os resultados se ajustaram melhor entre os tempos de retorno de 10 a 100 anos, representativos da média usada. Portanto, como era o objetivo, os hidrogramas obtidos representam (em termos de volumes de escoamento), as condições da vazão máxima diária obtida pela regionalização. Na mesma Figura 6 foram apresentados os valores das vazões médias obtidas com base nos valores de CN estimados com base nas tabelas de literatura (método original). Os valores obtidos CN com base no método proposto tem mais consistência devido ao uso de dados regionais medidos de vazão e apresentam valores maiores que o método original.

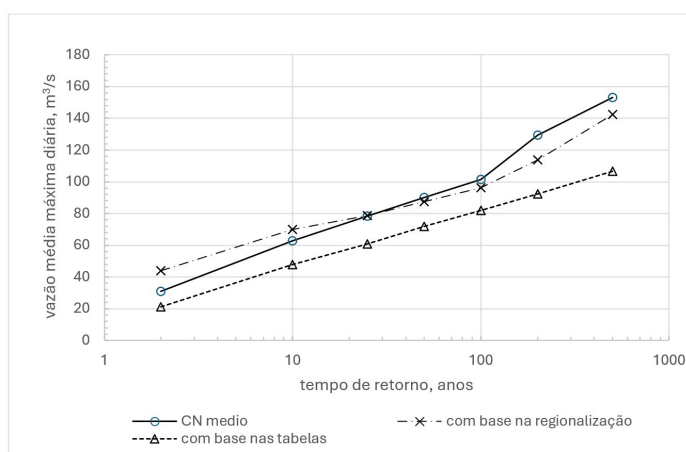


Figura 6. Vazão máxima diária da regionalização, obtidas dos hidrogramas simulados com CN ajustado (média para os tempos de retorno de 2 a 200 anos) e com CN =66,9, baseado em tabelas de referência (Tabela 1).

Vazão máxima instantânea

Para análise da vazão máxima instantânea, foram comparados os resultados obtidos pelos métodos baseados em: Regionalização + equação de Fuller; Modelo hidrológico com CN determinado pelo uso de tabelas do modelo NRSC; e O método proposto que usa o modelo hidrológico com o valor de CN ajustado a partir do método da regionalização.

Na Figura 7 os resultados mostram que a metodologia proposta neste artigo apresenta os resultados maiores. São em média 39% maiores, para os tempos de retornos de 10 a 200 anos, se comparados com a metodologia de Regionalização + Fuller e 23,8% maiores que o método que utiliza a chuva de projeto e o CN estimado por tabelas. A metodologia proposta chegou a um valor de CN médio de 74,6, superior ao obtido com base no exame do uso do solo e cobertura e uso das tabelas.

A metodologia apresentada é mais consistente que o método com CN determinado por tabelas, porque utiliza dados observados de vazão da região para estimar o CN e deve ser considerado mais próximo da realidade. Também pode ser considerado mais consistente que o método da Regionalização + equação de Fuller, porque esta equação que determina a vazão máxima instantânea é limitada e o método não permite determinar o hidrograma, mas apenas a vazão máxima.

Existe uma incerteza adicional do modelo hidrológico, que não foi abordada neste artigo, que é a estimativa do tempo de concentração. Usualmente são utilizadas equações empíricas que subestimam este parâmetro, que superestima as vazões.

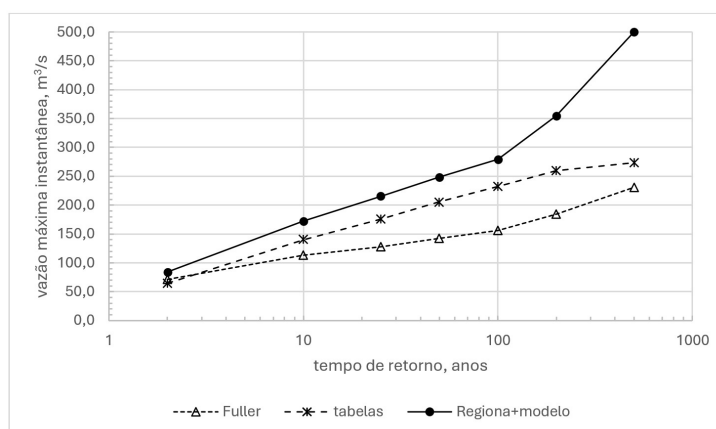


Figura 7. Vazão máxima instantânea obtidas: Regionalização + Fuller; modelo hidrológico chuva - vazão com CN obtido por tabelas; método proposto regionalização + modelo chuva - vazão para os tempos de retorno.

Hidrogramas

Na Figura 8 são apresentados os hidrogramas de 100 anos pelo modelo proposto e o hidrograma obtido com base no CN das tabelas, mostrando as diferenças de pico e distribuição do volume dos hidrogramas.

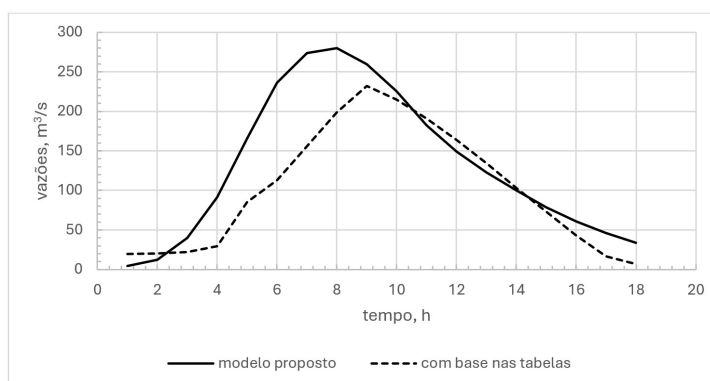


Figura 8. Comparação dos hidrogramas de 100 anos pelo método proposto e com base nas tabelas.

CONCLUSÃO

A prática usual para determinar a vazão máxima instantânea e o hidrograma de projeto para bacias hidrográficas com limitados dados é a de usar a precipitação com um tempo de retorno associado a um modelo precipitação-vazão ou a regionalização combinada com a equação de Fuller para a vazão máxima instantânea, mas sem o hidrograma de projeto.

A metodologia proposta permite a estimativa do parâmetro CN com base na regionalização e a vazão máxima instantânea e o hidrograma projeto com base em dados observados da região, reduzindo as incertezas das estimativas.

O estudo foi aplicado à bacia do rio Camboriú na seção do parque, com 128 km² e tempo de concentração de 6 horas. Os valores de CN foram estimados de acordo com as características da bacia e obtidos os hidrogramas para alguns tempos de retorno. Os resultados obtidos foram comparados entre três metodologias: regionalização da vazão média de cheia + método de Fuller, estimativa de CN por tabelas e o método proposto neste estudo, baseado na regionalização na estimativa do CN. Os resultados do modelo proposto apresentaram os resultados mais altos e ajustados com os dados regionais para a bacia estudada. A vantagem do método proposto está na determinação deste parâmetro do modelo, com base nas vazões da região para o mesmo tempo de retorno, reduzindo as incertezas da sua estimativa.

Estes resultados são utilizados em bacias sem dados onde é possível aplicar a regionalização de vazões, ou seja, que existem postos com dados nestas dimensões na região e sejam representativos da área onde é desejado o hidrograma.

Na metodologia existe ainda um parâmetro com incerteza, que não foi abordado neste artigo, que é o tempo de concentração, que deve influenciar a vazão máxima instantânea, pois o tempo de concentração tem efeito sobre translado das ondas de cheia, o que poderia afetar a vazão máxima instantânea.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas – ANA. (2018). *Produção de base vetorial com o Curve Number (CN) para BHO 2014 (BHO_CN)* (Nota Técnica, No. 46/2018/SPR). Brasília: ANA.
- Brandão, A. R. A., Schwambach, D., Ballarin, A. S., Ramirez-Avila, J. J., Vasconcelos Neto, J. G., & Oliveira, P. T. S. (2025). Toward a better understanding of curve number and initial abstraction ratio values from a large sample of watersheds perspective. *Journal of Hydrology*, 655, 132941.
- BELL, F.C., 1969 Generalized rainfall duration frequency relationships Journal of the Hydraulics Division American Society of Civil Engineers, New York v.95 n.1 jan.
- Brunner, M. I., Seibert, J., & Favre, A. (2018). Representative sets of design hydrographs for ungauged catchments: a regional approach using probabilistic region memberships. *Advances in Water Resources*, 112, 235-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.12.018>.
- Canuti, P., & Moisello, U. (1982). Relationship between the yearly maxima of peak and daily discharge for some basins in Tuscany. *Hydrological Sciences Journal*, 27, 111-128.
- Chen, B., Krajewski, W. F., Liu, F., Fang, W., & Xu, Z. (2017). Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow. *Hydrology Research*, 48(6), 1474-1488.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. (1979). *Drenagem urbana: manual de projeto* (476 p.). São Paulo: CETESB.
- Correia, F.N. (1983). *Métodos de análise e determinação de caudais de cheia*. Lisboa: LNEC.
- Duan, Q., Schaake, J., Andréassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H. V., Gusev, Y. M., Habets, F., Hall, A., Hay, L., Hogue, T., Huang, M., Leavesley, G., Liang, X., Nasonova, O. N., Noilhan, J., Oudin, L., Sorooshian, S., Wagener, T., & Wood, E. F. (2006). Model parameter estimation experiment (MOPEX): an overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 3-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.031>.
- Duran-Barroso, P., Gonzalez, J., & Valdes, J. B. (2017). Sources of uncertainty in the NRSC CN model: recognition and solution. *Hydrological Processes*, 31(22), 3898-3906.
- Eletrobras. (2000). *Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas* (458 p.). Rio de Janeiro.
- Ellis, W., & Gray, M. (1966). Interrelationships between the peak instantaneous and average daily discharges of small prairie streams. *Canadian Agricultural Engineering*, 8(1), 1-39.

- Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI. (1999). *Bacia hidrográfica do rio Camboriú Mapa do uso Atual da Terra*. Florianópolis: EPAGRI.
- Fill, H. D., & Steiner, A. A. (2003). Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow data. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8, 365-369.
- Fleischmann, A. S., Collischon, W., & Paiva, R. C. D. (2019). Estimating design hydrograph at the basin Scale from event-based to continuous hydrological simulation. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24, e4.
- Fuller, W. E. (1914). Flood flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 77, 564-617.
- Keifer, C. J., & Chu, H. H. (1957). Synthetic storm pattern for drainage design. *Journal of the Hydraulics Division*, 83(4), 1332.1-1332.25.
- Laipelt, L., Andrade, B. C., Collischonn, W., Amorim, A., Paiva, R. C. D., & Ruhoff, A. (2024). ANADEM: a digital terrain model for South America. *Remote Sensing*, 16(13), 2321.
- Langbein, W. B. (1949). Storage in relation to flood waves. In O. Meinzer (Ed.), *Hydrology*. New York: Dover Publication.
- Młyński, D., Petroselli, A., & Wałęga, A. (2018). Flood frequency analysis by an event-based rainfall-runoff model in selected catchments of southern Poland. *Soil and Water Research*, 13, 170-176.
- Natural Environment Research Council – NERC. (1975). *Floods studies report* (5 vol.). London: Meteorological Office.
- Porto, R. L., Zahed, K., Tucci, C. E. M., & Bidone, F. (1993). Drenagem urbana. In C. E. M. Tucci (Ed.), *Hidrologia: ciência e aplicação* (Cap. 21). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.
- Raudikivi, A. J. (1979). *Hidrology* (479 p.). Oxford: Pergamon.
- Samuel, J., Coulibaly, P., & Metcalfe, R. A. (2011). Estimation of continuous stream flow in Ontario ungauged basins: comparison of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 447-459.
- Sangal, B. P. (1983). Practical method of estimating peak flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109, 549-563.
- Silva, E., & Tucci, C. E. M. (1998). Relação entre as vazões máximas diárias e instantâneas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3(1), 133-151.
- Sui, J. (2005). Estimation of design Hydrograph for an ungagged watershed. *Water Resources Management*, 19, 813-830.
- Taborga, J. T. (1974). *Práticas hidrológicas*. Rio de Janeiro: Transcom.
- Taguas, E. V., Ayuso, J. L., Pena, A., Yuan, Y., Sanchez, M. C., Giraldez, J. V., & Pérez, R. (2008). Testing the relationship between instantaneous peak flow and mean daily flow in a Mediterranean Area Southeast Spain. *Catena*, 75, 129-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2008.04.015>.
- Tucci, C. E. M. (1993). *Hidrologia: ciência e aplicação* (952 p.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.
- Tucci, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos* (650 p.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.
- Tucci, C. E. M. (2007) *Inundações urbanas* (389 p.). Porto Alegre: ABRH.
- U.S. Department of Agriculture – USDA. Natural Resources Conservation Service. (1975). *Urban hydrology for small watersheds* (Technical Release, No. 55). Washington, D.C.: USDA.

Contribuições dos autores:

Carlos Eduardo Morelli Tucci: Contribuição de todo o conteúdo do artigo.