

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**SILVIO ROMERO DUARTE PEREIRA**

**ANÁLISE DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO HIDROGRAMA  
CONCEITUAL DE NASH EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SUL DE MINAS  
GERAIS**

**POÇOS DE CALDAS - MG**

**2023**

**SILVIO ROMERO DUARTE PEREIRA**

**ANÁLISE DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO HIDROGRAMA  
CONCEITUAL DE NASH EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SUL DE MINAS  
GERAIS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves

**POÇOS DE CALDAS - MG**

**2023**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Pereira, Silvio Romero Duarte.

Análise do processo chuva-vazão utilizando hidrograma conceitual de Nash em bacias hidrográficas do sul de Minas Gerais / Silvio Romero Duarte Pereira. - Poços de Caldas, MG, 2023.

62 f. : il. -

Orientador(a): Flávio Aparecido Gonçalves.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Modelos hidrológicos . 2. Escoamento superficial. 3. Hidrologia urbana. I. Gonçalves, Flávio Aparecido, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

## SILVIO ROMERO DUARTE PEREIRA

### Análise do processo chuva-vazão utilizando hidrograma conceitual de Nash em bacias hidrográficas do Sul de Minas Gerais

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 30 de janeiro de 2023

Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Latuf  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi  
Instituição: Universidade Federal de São Carlos



Documento assinado eletronicamente por **Flávio Aparecido Gonçalves, Professor do Magistério Superior**, em 01/02/2023, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo de Oliveira Latuf, Professor do Magistério Superior**, em 01/02/2023, às 13:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael de Oliveira Tiezzi, Usuário Externo**, em 01/02/2023, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0909612** e o código CRC **C209987A**.

Dedico este trabalho aos meus sogros, Angela e Osvaldo, exemplos de caráter e honestidade, que partiram para vida eterna. Recebam essa singela homenagem onde estiverem.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, por sempre guiar e iluminar os meus caminhos.

A minha querida esposa, Carol, pela dedicação à nossa família, companheirismo, união, amizade e paciência de todos os dias. Não foi fácil, mas cheguei até aqui graças a você.

Aos meus pais, João e Rosani, pelo exemplo, pela base sólida de valores que eu carrego sempre comigo.

Ao melhor amigo e companheiro, meu cão Klaus, pelas alegrias que você trouxe desde que chegou em minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Flávio Aparecido Gonçalves, agradeço pela oportunidade, pela orientação, pelos ensinamentos e conhecimento transmitido, pela paciência e confiança em seguir com o trabalho mesmo em meio as tantas dificuldades.

Meus sinceros agradecimentos a todo corpo docente e funcionários do PPGCEA da UNIFAL, com quem tive oportunidade de conviver e aprender mesmo que tenha sido por pouco tempo. Minha passagem por essa instituição foi de extrema importância para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos colegas Bruna, Isabella e Thiago pelo apoio direta ou indiretamente no decorrer dos estudos e desenvolvimento do meu trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Os sonhos não envelhecem”*

(Márcio Borges)

## RESUMO

Tendo em vista que o crescimento populacional, o avanço da urbanização e a ação antrópica em ambientes naturais têm acarretado impactos ambientais de diferentes naturezas e que a impermeabilização desses espaços pode causar enchentes e a diminuição da qualidade das águas, faz-se cada vez mais necessária a quantificação dos efeitos gerados por esses processos. O hidrograma conceitual de Nash (1957) é um modelo de chuva-vazão que considera a bacia hidrográfica como um sistema linear que é função de dois parâmetros, sendo eles o número de reservatórios ( $n$ ) e a taxa de decaimento ( $k$ ). Como forma de avaliar as diferenças e comparar duas situações distintas, os valores desses parâmetros foram calculados para eventos de duas estações diferentes, a estação Itajubá, no rio Sapucaí, e a estação PCH Ninho da Águia Montante, localizada no rio Santo Antônio. Essas estações estão localizadas em Municípios vizinhos, sendo que o rio Santo Antônio é afluente do Sapucaí. Para a separação do escoamento foi utilizado o método de separação gráfica. Da totalidade dos eventos estudados, três foram descartados pelo fato de apresentarem resultados anormais para o estudo, sendo que a justificativa é que exista alguma perturbação na vazão medida que ocasionou esse problema. Os valores médios de  $n$  e  $k$  para a estação Itajubá foram de 8,63 e 15,81, respectivamente, enquanto para a estação PCH Ninho da Águia Montante esses mesmos valores foram 4,13 e 10,03. A média dos valores de  $R^2$  foram de 0,48 e 0,51, respectivamente, sendo considerado aceitável. Houve boa correlação entre os parâmetros  $n$  e  $k$  para as duas estações, sendo maior na de Itajubá. No que tange ao tempo de pico ( $t_p$ ), houve maior correlação deste com o parâmetro  $n$  na estação Itajubá, enquanto ocorreu o contrário quando se analisou a correlação entre a vazão de pico ( $Q_p$ ) e o parâmetro  $k$ . Os dados obtidos mostraram que a modelagem se mostrou eficiente e a aplicabilidade do modelo foi satisfatória.

**Palavras-chave:** Modelos hidrológicos; Escoamento superficial; Hidrologia urbana.

## ABSTRACT

Bearing in mind that population growth, the advance of urbanization and anthropic action in natural environments have led to environmental impacts of different natures and that the waterproofing of these spaces can cause floods and decrease the quality of water, it is increasingly necessary the quantification of the effects generated by these processes. Nash's conceptual hydrograph (1957) is a rainfall-runoff model that considers the watershed as a linear system that is a function of two parameters, namely the number of reservoirs ( $n$ ) and the rate of decay ( $k$ ). As a way of evaluating the differences and comparing two different situations, the values of these parameters were calculated for events at two different stations, the Itajubá station on the Sapucaí river and the PCH Ninho da Águia Montante station, located on the Santo Antônio river. These stations are located in neighboring municipalities, and the Santo Antônio river is a tributary of the Sapucaí. For the flow separation, the graphic separation method was used. Of all the events studied, three were discarded due to the fact that they presented abnormal results for the study, and the justification is that there is some disturbance in the measured flow that caused this problem. The average values of  $n$  and  $k$  for the Itajubá station were 8.63 and 15.81, respectively, while for the PCH Ninho da Águia Montante station these same values were 4.13 and 10.03. The average values of  $R^2$  were 0.48 and 0.51, respectively, being considered acceptable. There was a good correlation between the  $n$  and  $k$  parameters for the two stations, being higher in Itajubá. With regard to the peak time ( $t_p$ ), there was a greater correlation between this and the  $n$  parameter at the Itajubá station, while the opposite occurred when the correlation between the peak flow ( $Q_p$ ) and the  $k$  parameter was analyzed. The data obtained showed that the modeling was efficient and the applicability of the model was satisfactory.

**Keywords:** Hydrological models; Surface runoff; Urban hidrology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo hidrológico e suas interações.....	18
Figura 2 – Alterações no balanço hídrico em áreas pré e pós urbanizadas. ....	20
Figura 3 – Modelo simplificado de bacia hidrográfica.....	21
Figura 4 – Tipos mais comuns de padrões de chuvas.....	23
Figura 5 – Hidrograma resultante da ocorrência de uma precipitação na área contribuinte. ...	23
Figura 6 – Esquema ilustrativo de um hidrograma unitário. ....	26
Figura 7 – Esquema do modelo proposto por Nash. ....	29
Figura 8 – Localização da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí. ....	34
Figura 9 – Localização das estações estudadas. ....	35
Figura 10 – Representação esquemática do modelo de Nash para $n$ reservatórios. ....	38
Figura 11 – Matrizes de escoamento superficial (a) e precipitação efetiva (b). ....	39
Figura 12 – Convolução na forma matricial. ....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos dados Estação Itajubá.....	41
Tabela 2 – Resumo dos dados PCH Ninho da Águia Montante.....	42

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resumo dos hidrogramas unitários obtidos.....	43
Gráfico 2 – Resumo dos hidrogramas estimados pela convolução. ....	44
Gráfico 3 – Correlação $n$ x $k$ .....	45
Gráfico 4 – Influência do parâmetro $n$ no tempo de pico ( $t_p$ ).....	45
Gráfico 5 – Influência do parâmetro $k$ na vazão de pico ( $Q_p$ ).....	46

## LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento
C	Coefficiente de Escoamento Superficial
CN	Curva Número
ECP	Estado de Calamidade Pública
HCN	Hidrograma Conceitual de Nash
HIDROWEB	Sistema de Informações Hidrológicas
HU	Hidrograma Unitário
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
k	Taxa de Decaimento
n	Número de Reservatórios
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Precipitação
Pe	Precipitação Efetiva
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
Q <sub>est</sub>	Vazão estimada
Q <sub>obs</sub>	Vazão observada
Q <sub>p</sub>	Vazão de Pico
Q <sub>s</sub>	Deflúvio Superficial
R	Coefficiente de Pearson
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
SCS	Soil Conservation Service
SE	Situação de Emergência
t	Tempo

$t_b$	Tempo de Base
$t_c$	Tempo de Concentração
$t_p$	Tempo de Pico
USGS	United States Geological Survey
UNIFAL	Universidade Federal de Alfenas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	CICLO HIDROLÓGICO: COMPONENTES E RELAÇÕES.....	18
2.2	BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	20
2.3	HIDROGRAMA.....	22
2.4	PRINCIPAIS MODELOS HIDROLÓGICOS .....	24
2.5	PROCESSO CHUVA-VAZÃO E HIDROGRAMA DE NASH .....	28
<b>3</b>	<b>ARTIGO.....</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água, em seu estado líquido, é uma substância muito presente na natureza. Ela também pode ser encontrada nos estados sólido e gasoso e constitui-se como um elemento essencial para a manutenção da vida na terra como conhecemos.

Os problemas ocasionados pelo seu excesso, falta e qualidade, por exemplo, sempre foram motivo de atenção e estudo pelo homem e isso pôde ser notado ao longo da história através de diversos estudos e implantação de obras como aquedutos, canais, barragens, poços, estações de tratamento, etc.

Precipitações de magnitude elevada, por exemplo, contribuem para a ocorrência de enchentes – acúmulo de água em zonas não desejadas dentro de uma cidade – que afetam diversas cidades no mundo (HERNANDEZ; SZIGETHY, 2020). As mudanças climáticas no planeta, somado à expansão urbana e contaminação de fontes de água contribuem diretamente para esse processo.

De acordo com dados da ANA (2021), a situação no Brasil não é diferente, sendo que dos 5.570 municípios brasileiros, 2.753 (49,4%) decretaram situação de emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP) devido às cheias, pelo menos uma vez, de 2003 a 2020. Só em 2020, mais de 800 mil pessoas foram afetadas por cheias (alagamentos, enxurradas e inundações) no Brasil.

Estima-se que, em 1950, a parcela da população mundial concentrada em zonas urbanas era de 30%. Em 2018, correspondeu a 55% e espera-se que em 2050 essa quantidade chegue a 68% (ONU, 2021). Já no Brasil, estima-se que a porção da população concentrada em áreas urbanas corresponde a 84% (IBGE, 2021).

O aumento desordenado e também ordenado da ocupação urbana nas últimas décadas, fez com que surgissem cada vez mais áreas com grandes densidades populacionais. E esse aumento possui impacto direto nos recursos hídricos, sendo que existe uma desconexão entre crescimento populacional e planejamento hídrico.

A impermeabilização do solo, que pode ser ocasionada por diversos fatores, causa diversos impactos na rede de drenagem, sendo que um dos principais é diminuição da superfície permeável levando ao aumento do escoamento superficial e redução do subterrâneo. Há também uma redução da evapotranspiração, rebaixamento do lençol freático e aumento de material sólido proveniente do lixo.

Esses fatores, somados a degradação e contaminação dos cursos d'água, interferem na velocidade do escoamento superficial em áreas urbanas, reduzindo tempo de pico e aumentando a vazão de pico.

Tucci (1997) afirma que é necessário quantificar os impactos decorrentes da expansão urbana, que resultam em alterações da bacia hidrográfica. Para isso, podem ser utilizados métodos estatísticos e modelos matemáticos.

Um desses modelos é o Hidrograma Conceitual de Nash, que se trata de um modelo conceitual de base física e propõe uma modelagem do tipo chuva-vazão, sendo baseado em dados de séries históricas de precipitação e vazão. O modelo de Nash considera a bacia como um sistema linear em que a resposta a um estímulo de precipitação efetiva é dada por dois parâmetros,  $n$  e  $k$ , sendo o primeiro o número de reservatórios e o segundo a taxa de decaimento.

Portanto, a realização deste trabalho se justifica na necessidade, cada vez maior, de se estudar o comportamento do escoamento superficial em diferentes áreas, procurando fornecer subsídios para estudos mais aprofundados acerca do impacto de alterações antrópicas no local (Ex: desenvolvimento de cidades, construção de barragens, etc.), através da modelagem matemática de eventos de precipitação.

O estudo proposto nesta dissertação consiste então na aplicação do Hidrograma Conceitual de Nash em dados de precipitação e vazão obtidos de duas estações fluviométricas localizadas em Municípios vizinhos no Sul de Minas Gerais, com o intuito de analisar e comparar o comportamento do escoamento superficial através das vazões, vazões de pico e tempo de pico nos pontos analisados, bem como a validação do modelo para os casos estudados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

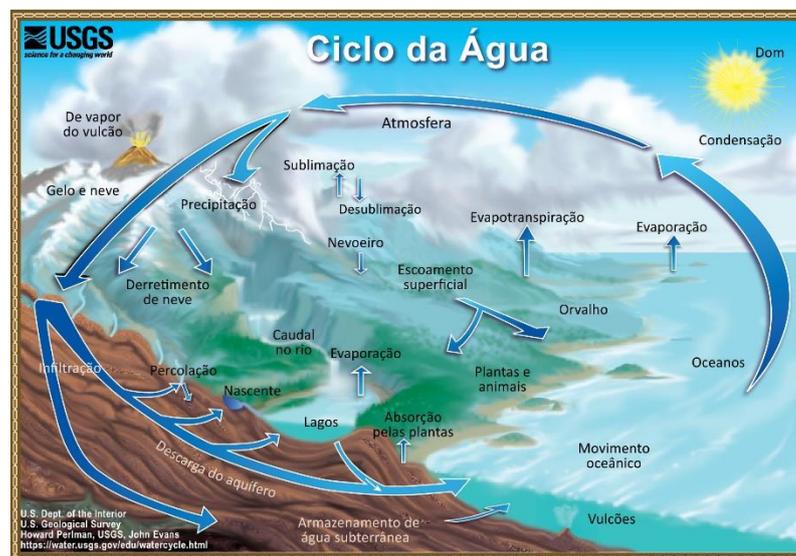
### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO: COMPONENTES E RELAÇÕES

Ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada a gravidade e à rotação terrestre, sendo fechado somente em escala global (SILVEIRA; TUCCI, 2000).

Lima (2008) diz que o ciclo hidrológico, mais do que uma simples sequência de processos, constitui-se de um conjunto de fases, as quais representam os diferentes caminhos através dos quais a água circula na natureza.

Righetto (1998) afirma que o ciclo hidrológico é o processo natural de evaporação, condensação, precipitação, detenção e escoamento superficial, infiltração, percolação da água no solo e aquíferos, escoamentos fluviais e interações entre esses componentes. Já para Miranda *et al.* (2010), as principais etapas do ciclo hidrológico incluem: evapotranspiração, precipitação, interceptação, infiltração e escoamento. A Figura 1 representa o ciclo da água e suas interações.

Figura 1 – Ciclo hidrológico e suas interações



Fonte: USGS (<https://www.usgs.gov/media/images/o-ciclo-da-gua-water-cycle-portuguese>, acessado em julho de 2022).

A evapotranspiração se refere à água perdida do ambiente físico (solo e corpos hídricos) para atmosfera pela evaporação, junto a água que é perdida pela transpiração dos seres vivos. Após a evapotranspiração ocorre a transformação do vapor de água em nuvem e, através da

condensação, ocorre a precipitação. A água precipitada pela chuva pode atingir diretamente a superfície (terrestre ou aquática) ou pode ser interceptada pelas copa das árvores ou qualquer outro tipo de cobertura (MIRANDA *et al.*, 2010).

A interceptação da água da chuva é um processo físico protagonizado pela vegetação de qualquer ambiente (urbano ou florestal), em que a precipitação é interceptada, fracionada e distribuída pela cobertura vegetal. Essa, por sua vez, tem fundamental participação nos processos hidrológicos, geomorfológicos e pedológicos do sistema vertente. Em decorrência da interceptação há o retardamento do processo de escoamento superficial, além de influenciar a dinâmica do balanço hídrico (BRITTO, BAPTISTA; LIMA, 2019).

Ao atingir o solo a água da chuva pode infiltrar ou escoar superficialmente, a depender do tipo e uso do solo naquele local. A interface solo-vegetação-atmosfera exerce forte influência sob o ciclo hidrológico e, associado aos processos ecossistêmicos já naturalmente complexos, se insere nesse contexto também a ação humana (TUCCI; CLARKE, 1997).

Os parâmetros são correlacionáveis e mostram que a infiltração e o escoamento superficial são processos dependentes entre si e que os fatores específicos de cada ambiente influenciam os dois fenômenos de maneira significativa (CUOMO; DELLA SALA, 2013).

De acordo com Yang & Zhang (2011) a taxa de infiltração de água no solo diminui com o aumento do grau de compactação e também com o aumento da densidade superficial do solo e conseqüente redução de sua porosidade.

Segundo Silva *et al.* (2008), o escoamento superficial é o seguimento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície da terra, sendo um dos mais importantes para o manejo de uma bacia hidrográfica. Este resulta da parcela da precipitação que excede a capacidade de infiltração do solo e escoar sobre sua superfície, gerando cheias; é frequente quando ocorrem precipitações muito intensas e/ou quando o solo já está muito umedecido ou com a capacidade de infiltração reduzida. Esta parcela é conhecida como precipitação efetiva ou deflúvio superficial. Um outro tipo de escoamento muito importante é o subterrâneo, que é aquele produzido pela drenagem do aquífero subterrâneo e de grande importância do ponto de vista ambiental.

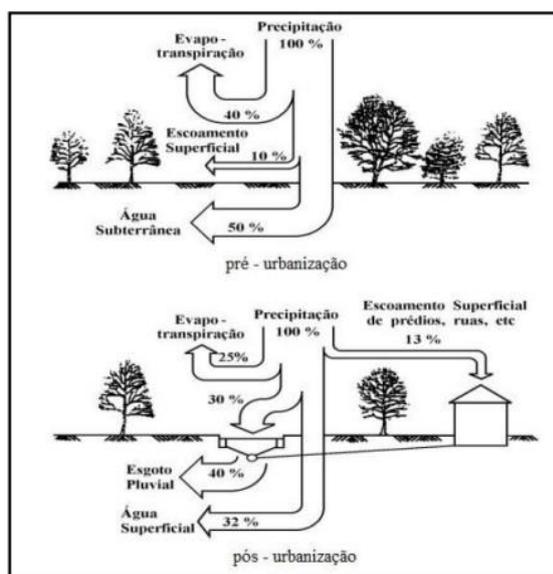
Normalmente, o escoamento aumenta com a retirada da vegetação, relação visível principalmente em bacias de pequeno porte (TUCCI; CLARKE, 1997). O escoamento vai estar diretamente relacionado com a relação precipitação/evapotranspiração e a disponibilidade atual de água no solo, a qual é limitada pela capacidade máxima de armazenamento da água para cada bacia (KARNIELE; ASHER, 1993).

O escoamento superficial também está relacionado com as características climáticas e físicas da área, como intensidade e duração da precipitação, ao tipo de solo, à declividade do terreno, a cobertura vegetal (em função da vegetação natural e uso e ocupação da terra) e ao relevo. (PRUSKY; RODRIGUES; SILVA, 2001).

Os processos acima referidos são comuns ao ciclo hidrológico em todas as regiões do globo, contudo, as taxas em que tais processos operam se diferenciam geralmente em função do clima, relevo e capacidade de armazenamento de água no substrato (CHRISTOFOLETTI, 1999).

A urbanização aumenta a quantidade de áreas impermeáveis e, assim, minimiza a infiltração e fluxo subsuperficial na área de bacias hidrográficas (CHUI; TRINH, 2016). A ocupação do solo tende a diminuir sua cobertura vegetal aumentando as áreas impermeabilizadas, com conseqüente diminuição da infiltração de água e aumentando o escoamento superficial. A Figura 2 demonstra um exemplo de alterações no balanço hídrico em áreas pré e pós-urbanizadas.

Figura 2 – Alterações no balanço hídrico em áreas pré e pós urbanizadas



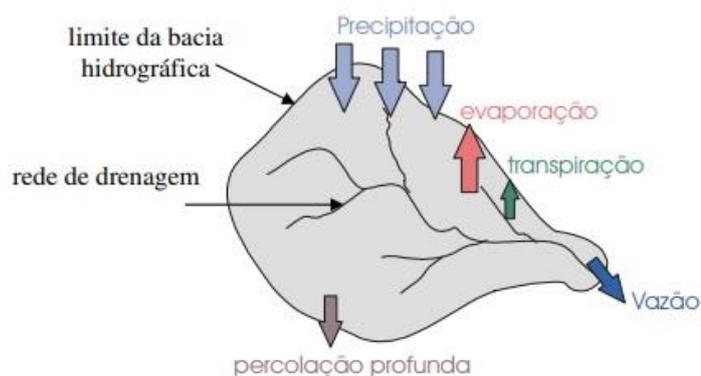
Fonte: DECINA (2012, p. 24).

## 2.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS

A bacia hidrográfica é uma área que recebe água de chuva e consiste de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem que formam os cursos d'água que fluem até o exutório. Trata-se de um sistema físico onde a entrada é um volume de água precipitado e a

saída é um volume de água escoado, a se ponderar as perdas pela infiltração e a evapotranspiração (TUCCI, 2002). A figura 3 exemplifica um modelo simplificado de uma bacia:

Figura 3 – Modelo simplificado de bacia hidrográfica



Fonte: PAZ (2004, p. 16).

Outra definição, segundo Targa (2008), é a de que a bacia hidrográfica é definida como o conjunto de terras limitadas por divisores de água contendo uma rede de drenagem que drena a água para um ponto denominado exutório. O sistema de drenagem dessa bacia é composto de nascentes dos cursos d'água, principais e secundários, denominados afluentes e subafluentes.

Lima (2008) diz ainda que uma bacia hidrográfica compreende toda a área de captação natural da água da chuva que proporciona escoamento superficial para o canal principal e seus tributários, sendo seu limite superior o divisor de águas (divisor topográfico) e a delimitação inferior a saída da bacia (confluência, exutório).

A bacia hidrográfica apresenta elementos físicos, biológicos e humanos que juntos se interrelacionam (LEAL, 2003). Sendo assim, ela funciona como um sistema aberto, integrando elementos naturais (relevo, solos, vegetação, etc.), mas também elementos humanos (edificações, arruamentos, etc.), compreendendo processos geomorfológicos, hidrológicos e socioambientais (MENEZES; SALGADO, 2018).

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características morfológicas, ou seja, área, forma, topografia, geologia, solo, cobertura vegetal, etc (LIMA, 2008). Esse comportamento também é influenciado, principalmente, pelo regime climático das precipitações.

Christofolletti (1974) classificou as bacias de drenagem da seguinte forma:

- a) Exorreicas: escoamento contínuo até o mar;
- b) Endorreicas: não possuem escoamento até o mar;

- c) Arreicas: não há qualquer estruturação em bacias (Ex: desertos);
- d) Criptorreicas: quando as bacias são subterrâneas.

Da mesma forma, classificou também os cursos d'água em:

- a) Perenes: há fluxo o ano todo, ou pelo menos em 90% do ano, em canal bem definido;
- b) Intermitentes: De modo geral, só há fluxo durante a estação chuvosa;
- c) Efêmero: Só há fluxo durante chuvas ou períodos chuvosos, sendo que os canais não são bem definidos.

Por fim, é válido ressaltar que no Brasil a bacia hidrográfica constitui-se como unidade territorial para fins de planejamento e gestão, conforme estabelecido pela Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei Federal Nº 9.433/1997.

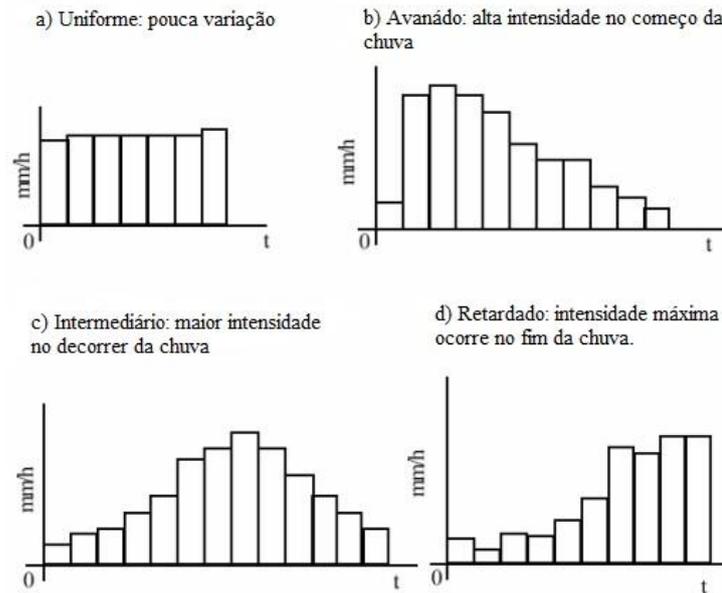
### **2.3 HIDROGRAMA**

A precipitação pode ser entendida como toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Chuva, granizo, saraiva, orvalho e neve são formas diferentes de precipitações. A diferença entre essas é o estado em que a água se encontra (BERTONI; TUCCI, 1993).

Para estudar ou avaliar o escoamento superficial é de grande utilidade o traçado do hidrograma, que consiste em um gráfico da evolução da vazão ao longo do tempo. Para um rio, o hidrograma se refere a uma seção transversal específica, já que ao longo do seu curso o rio vai recebendo mais contribuições (volume de água) e aumentando sua vazão. Assim, tomando uma determinada seção de um rio, o hidrograma correspondente ao volume de água escoado por unidade de tempo através daquela seção (PAZ, 2004).

Lima (2008) afirma que o hidrograma consiste em um gráfico da intensidade da chuva (ordenada) pelo tempo (abscissa). Esse histograma permite a classificação das chuvas em quatro padrões distintos. O conhecimento destes padrões é importante, por exemplo, para a avaliação da provável resposta hidrológica da microbacia a um dado evento chuvoso, conforme explicado na figura 4.

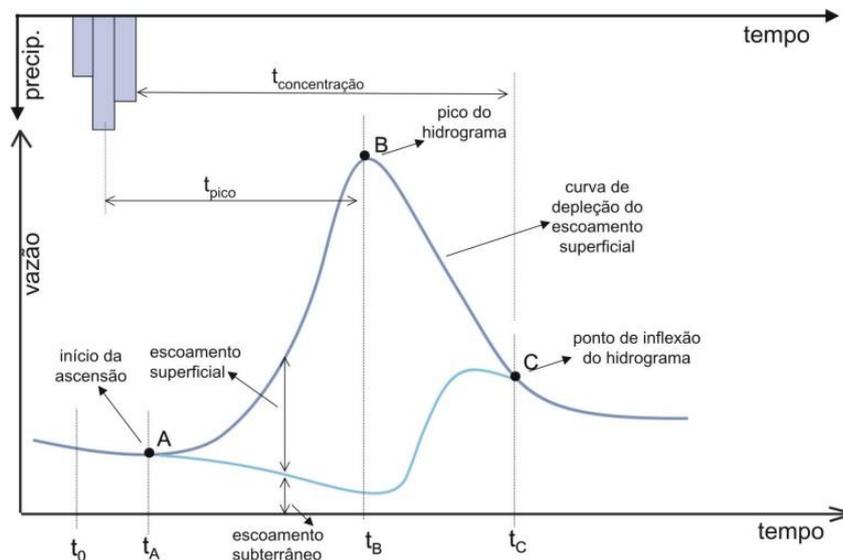
Figura 4 – Tipos mais comuns de padrões de chuvas



Fonte: Adaptado de LIMA (2008).

O hidrograma é uma forma gráfica de representar o comportamento do escoamento superficial ou deflúvio em função do tempo em uma seção de controle. Righetto (1998) afirma que o hidrograma deve ser interpretado como a resposta da bacia hidrográfica quando ocorre o evento de chuva. A Figura 5 ilustra um exemplo de hidrograma para uma chuva isolada.

Figura 5 – Hidrograma resultante da ocorrência de uma precipitação na área contribuinte



Fonte: PAZ (2004, p. 49).

De acordo com o hidrograma exposto na figura 5, o ponto A é onde ocorre o aumento de vazão devido à precipitação (representada pelo gráfico de barras na parte de cima), sendo o ponto B o pico do hidrograma (máxima vazão) e o ponto C (inflexão) caracterizando o instante de tempo em que não ocorre mais escoamento superficial devido àquela precipitação. O trecho

A-B é chamado de curva de ascensão, enquanto o trecho B-C é a curva de depleção. O tempo de pico ( $t_p$ ) é aquele transcorrido desde o centro de massa da precipitação até o pico do hidrograma. Já o tempo de concentração ( $t_c$ ) é definido como o tempo necessário para que toda água precipitada do ponto mais distante contribua para seção analisada (PAZ, 2004).

Sendo assim, a determinação da intensidade de precipitação é importante para o controle de inundação e da erosão do solo, por exemplo. Por sua capacidade para produzir escoamento, a chuva é o tipo de precipitação líquida mais importante para a hidrologia (BERTONI; TUCCI, 1993).

## 2.4 PRINCIPAIS MODELOS HIDROLÓGICOS

A importância e a complexidade do fenômeno das cheias e, particularmente da relação chuva-vazão, são problemas clássicos que foram tratados pelos pesquisadores e especialistas ao longo de vários anos. A abordagem do estudo depende do tipo ou da disponibilidade de dados (MAIA; AMARAL; VERSIANI, 2006).

Os modelos hidrológicos procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em uma vazão numa determinada seção de um rio (TUCCI, 2010), valendo ressaltar que também existem modelos vazão-vazão. Para isso o desenvolvimento da informática teve um papel fundamental na evolução da modelagem hidrológica.

Idealmente, estudos hidrológicos para determinar os picos de escoamento superficial devem ser baseados em registros históricos de vazão. No entanto, raramente se consegue tais registros para bacias pequenas. Logo, os modelos hidrológicos que levam em consideração outros parâmetros podem ir de encontro à caracterização de uma bacia hidrográfica e suas modificações ao longo de sua ocupação. (USDA, 1986).

A modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, sobre todos os processos físicos que ocorrem durante a uma chuva, ou seja, a própria chuva ou precipitação, a interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial. Todos esses processos são representados através de modelos matemáticos (SANTOS, 2009).

Em virtude da vasta abundância de modelos existentes atualmente, é importante determinar o modelo adequado a ser utilizado em vista da quantidade e qualidade de dados

hidrológicos disponíveis, heterogeneidade física da bacia hidrográfica, diversidade dos processos envolvidos e as simplificações na representação dos fenômenos (TUCCI, 1998).

Tucci (1998) classificou os modelos da seguinte forma:

- a) Concentrado ou distribuído: é dito concentrado quando não leva em consideração a variabilidade da bacia. Enquanto o modelo distribuído é quando suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo;
- b) Estocástico ou Determinístico: quando a chance de ocorrência das variáveis for levada em consideração e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo este é dito estocástico. No entanto, quando para uma mesma entrada, o modelo produz uma mesma saída (com condições iniciais iguais) o modelo é classificado como determinístico (TUCCI, 1987);
- c) Conceitual ou empírico: Os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os empíricos são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão.

Santos (2009) afirma que os modelos conceituais ainda podem ser subclassificados em semiconceituais e físicos, sendo que os primeiros estão relacionados às características do processo, embora mantenham razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, enquanto o segundo utiliza as principais equações diferenciais do sistema físico para representar os processos e os seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da física do sistema.

Segundo Tucci (1998) e Fendrich (1984) os modelos hidrológicos apresentam vantagens e desvantagens, sendo essas últimas associadas à elevada quantidade de parâmetros calibráveis, além de alta variabilidade natural dos mesmos em escala de bacias hidrográficas, para os modelos conceituais e essencialmente físicos; as desvantagens se relacionam à dificuldade de aplicação para outros cenários de uso do solo e clima, para os essencialmente empíricos, os quais não contemplam parâmetros ligados à gênese do escoamento superficial.

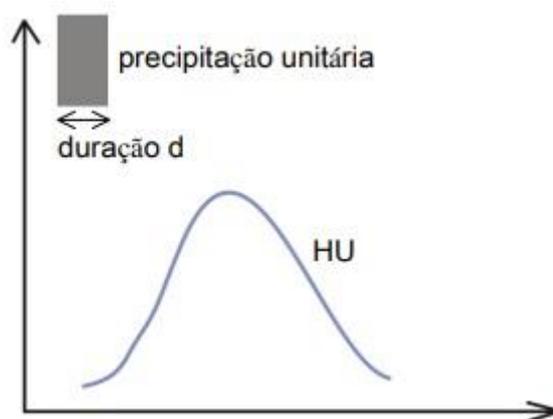
#### **2.4.1. Método Hidrograma Unitário**

Agirre *et al.* (2005) referem-se ao hidrograma unitário como um tipo de hidrograma muito utilizado para a estimativa do escoamento superficial e, também, a determinação de vazões de pico. É um hidrograma resultante de uma precipitação efetiva unitária, com

intensidade constante durante determinado tempo e uniformemente distribuída sobre uma área de determinada bacia hidrográfica.

O hidrograma unitário pode ser entendido como a vazão superficial (igual a vazão total menos a vazão de base) resultante de uma precipitação efetiva unitária (igual a 1mm). Para o intervalo de tempo unitário, adota-se o tempo correspondente a uma fração do tempo de base médio dos hidrograma na seção considerada (MAIA; AMARAL; VERSIANI, 2006). A figura 6 apresenta um esquema ilustrativo de um hidrograma unitário.

Figura 6 – Esquema ilustrativo de um hidrograma unitário



Fonte: PAZ (2004, p. 62).

Barbosa (2001) afirma que um dos modelos conceituais mais simples para representar cheias em pequenas e médias bacias é o chamado hidrograma unitário, proposto por Sherman (1932).

Esse modelo pode ser dividido em várias etapas, onde se relacionam os problemas e dificuldades na obtenção dos parâmetros envolvidos, sendo elas:

- Determinação das ordenadas do HU;
- Estimativa de chuva efetiva;
- Determinação dos escoamentos superficial e subterrâneo;
- Previsão de vazões.

#### 2.4.2. Método Racional

O Método Racional é um modelo de estimativa do escoamento superficial que foi muito utilizado na primeira metade do século XX. Suas aplicações estão concentradas em projetos que utilizam vazão máxima, como por exemplo em redes de drenagem pluvial e de esgoto (MORAES, 2005).

Garotti e Barbosa (2010 *apud* TERRA, 2021) discutem a praticidade do método, dizendo que todos os processos hidrológicos para transformação da precipitação em vazão são englobados em um único coeficiente de escoamento superficial  $C$ . Tucci (2001) destaca os princípios para utilização deste método, como sendo:

- a duração da precipitação intensa deve ser igual ao tempo de concentração;
- a chuva é uniformemente distribuída, tanto no tempo quanto no espaço da área da bacia hidrográfica;
- o valor do coeficiente  $C$  deve ser constante durante toda chuva.

Segundo Paz (2004), o método consiste apenas em estimar a vazão de pico do hidrograma para uma determinada bacia, considerando que a vazão é diretamente proporcional a área da bacia e a intensidade da chuva. O coeficiente  $C$  é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional) e seu valor é escolhido conforme o tipo de ocupação de solo, através do uso de tabelas encontradas na literatura especializada.

### 2.4.3. Método Curva-Número

O Método da Curva Número (CN) é um dos mais utilizados para a previsão do escoamento superficial direto a partir da conversão de chuva em uma bacia hidrográfica (BARBOSA, 2021).

Esse método (SCS, 1956) foi desenvolvido em 1954 pelo *Soil Conservation Service* (CN – SCS), atual *Natural Resources Conservation Service*, do *US Department Of Agriculture*. O método CN - SCS foi desenvolvido a partir de estudos empíricos realizados em diversas regiões dos Estados Unidos, considerando diferentes condições e tipos de cobertura do solo. É utilizado para se estimar o volume de escoamento superficial em pequenas bacias hidrográficas, as quais sejam disponíveis informações relativas às condições do solo e da vegetação, além das precipitações antecedentes (PRUSKI *et al.*, 2001).

O método CN - SCS tem como objetivo a geração de um hidrograma de projeto para microbacias hidrográficas, portanto, a sua aplicabilidade em eventos isolados é questionável (MELLO, 2003).

Por fim, o método SCS assume que, em uma bacia hidrográfica, ao longo da duração de um episódio de chuva, são iguais o quociente do volume instantâneo de escoamento direto ( $Q$ ) pelo volume total de chuva ( $P$ ), e o quociente de infiltração ( $F$ ), acumulado até aquele instante, pelo volume máximo potencial de retenção ( $S$ ) (CUNHA *et al.*, 2015).

Esse método faz o uso da utilização de um número da curva constante que é definido com base em características físicas do solo, cobertura vegetal e precipitação antecedente. Esta adoção traz muita facilidade na aplicação do modelo, porém produz erros significativos na estimativa do deflúvio, quando se trata de um evento isolado (GROVE *et al.*, 1998 *apud* TERRA, 2021).

## 2.5 PROCESSO CHUVA-VAZÃO E HIDROGRAMA DE NASH

Dentre os modelos conceituais de base física que representam o escoamento superficial, pode-se destacar o modelo desenvolvido por Nash (1957), que representa o escoamento na bacia por  $n$  reservatórios em cascata e considera comportamento linear entre este e o armazenamento nos reservatórios (AGUIRRE *et al.*, 2005; TUCCI, 1998).

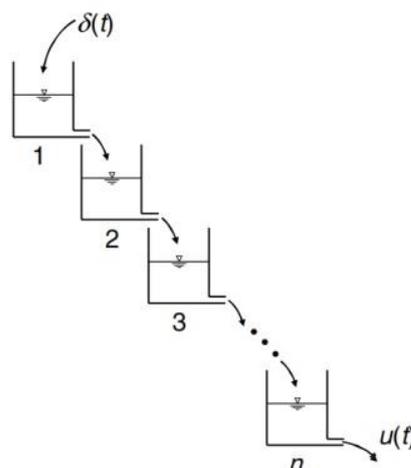
Nash (1957) representou o escoamento superficial direto em uma bacia hidrográfica por  $n$  reservatórios lineares em cascata, cuja situação considera uma precipitação uniforme ao longo da bacia e sua propagação até a respectiva seção de controle. A consideração de reservatórios simula uma situação de amortização da vazão de pico e outra de translação, ou seja, de um movimento de ondas do escoamento cujo efeito é mais pronunciado em canais ao longo da bacia. Fisicamente, a facilidade com que o reservatório drena o escoamento é representada por um parâmetro  $k$ , o qual reflete a resposta da bacia hidrográfica ao ser excitada por um ou mais eventos de precipitação efetiva (FENDRICH, 1984; TUCCI, 1998).

O hidrograma unitário instantâneo (HUI) de Nash é um hidrograma do tipo conceitual, ou seja, é aquele fundamentado pela teoria de que, se a intensidade da chuva efetiva for considerada como uma unidade e a sua duração infinitesimal, o hidrograma resultante é uma função resposta de impulso (CHOW *et al.*, 1988).

Este método admite que uma bacia hidrográfica possa ser representada por uma série de  $n$  reservatórios lineares idênticos, ou seja, todos com a mesma constante de armazenamento  $k$ . A combinação dos  $n$  reservatórios, conduz ao Hidrograma Unitário Instantâneo HUI-Nash (PÁDUA; NAGHETTINI, 2014).

Nash (1957) descreve a bacia como um sistema complexo que não pode ser descrito em termos de um ou dois parâmetros físicos. Esse hidrograma assume que a resposta da bacia a um impulso da precipitação é análoga a uma série de reservatórios lineares, mas acrescido de mais reservatórios, em série. (INNOCENTE, 2016). A Figura 7 exemplifica esse modelo.

Figura 7 – Esquema do modelo proposto por Nash



Fonte: INNOCENTE (2016, p. 41).

Diversos trabalhos utilizaram e utilizam a aplicação do Hidrograma de Nash no Brasil e no mundo. Bhaskar *et al.* (1997), por exemplo, relacionaram o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico aos parâmetros do modelo Nash-HUI. Este estudo mostrou que o modelo de Nash baseado no HUIG pode ser usado para a estimativa de inundações em bacias não calibradas com um razoável grau de precisão.

Aguire *et al.* (2005) compararam a aplicabilidade do modelo HUI de Nash com HU de Lopes e Gimena (2000) em uma pequena bacia hidrográfica, de Axiola, com 4,7 km<sup>2</sup> na Espanha, sendo que ambos apresentaram bons resultados para a geração de hidrogramas.

Sahoo *et al.* (2006) também aplicaram o modelo de Nash baseado no HUIG para estimativa de inundação na bacia do rio Ajay, norte da Índia. Os resultados demonstraram que estes podem ser usados com sucesso para a previsão do escoamento em bacias não calibradas ou bacias hidrográficas escassamente calibradas.

Adib *et al.* (2010) compararam a precisão dos modelos de Clark, baseado em HUIcG (HUIcG-Clark) e Nash baseado em HUIG (HUIG-Nash), sendo empregados com e sem o uso de dados históricos chuva-vazão, para determinar a forma, vazão de pico e tempo até o pico de hidrograma de escoamento superficial direto. O estudo foi realizado na bacia de Kasilian, no Irã, com uma área de 67,5 km<sup>2</sup> e os resultados obtidos foram satisfatórios.

No Brasil, Silva *et al.* (2008) avaliaram a aplicação do Modelo Conceitual de Nash em uma modelagem de dados de escoamento superficial na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela com 4,8km<sup>2</sup> de área de drenagem, alto rio Grande, Minas Gerais. Essa análise foi feita levando em conta as estações do ano e o modelo se mostrou adequado para esse caso.

Padua (2015) comparou resultados da aplicação do HUI-Nash com outros dois modelos aplicando-os em vinte bacias hidrográficas com área de drenagem entre 500 e 5000 km<sup>2</sup> definidas pelas estações fluviométricas existentes na bacia do alto rio São Francisco, Minas Gerais, encontrando bons resultados.

Innocente (2016), por sua vez, utilizou diversos modelos, entre eles o HU de Nash, para analisar o processo de chuva-vazão em uma sub-bacia do rio dos Bugres com área de 6,3km<sup>2</sup>, em rio Negrinho, Santa Catarina, concluindo que a influência no desempenho do HU está relacionada ao modelo de precipitação efetiva e que os resultados obtidos constatarem as premissas do modelo de Nash e demonstraram forte correlação em seus parâmetros.

Já Moura *et al.* (2019) avaliou o desempenho de diferentes propostas geomorfológicas para a determinação dos parâmetros do Hidrograma Unitário de Nash na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará, com área igual a 32,34 km<sup>2</sup>, localizada na região do alto rio Grande, Minas Gerais, através da seleção de 20 eventos chuva-vazão organizados em intervalos iguais de 30 minutos e com duração média de 15,7 horas, concluindo que o HUI de Nash combinado com propostas geomorfológicas tem potencial para auxiliar em projetos de drenagem e para compor sistemas de alerta de enchentes.

Terra (2021) realizou a modelagem chuva-vazão em 42 eventos de precipitação pelo método do HU de Nash na bacia hidrográfica do rio Santana, bacia de médio porte (790 Km<sup>2</sup>), localizada no Rio Grande do Sul, obtendo representatividade significativa para os eventos estudados, além de bons resultados.

### 3 ARTIGO

## ANÁLISE DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO HIDROGRAMA CONCEITUAL DE NASH EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SUL DE MINAS GERAIS

*Silvio Romero Duarte Pereira<sup>1</sup> & Flávio Aparecido Gonçalves<sup>2</sup>*

### RESUMO

Tendo em vista que o crescimento populacional, o avanço da urbanização e a ação antrópica em ambientes naturais têm acarretado impactos ambientais de diferentes naturezas e que a impermeabilização desses espaços pode causar enchentes e a diminuição da qualidade das águas, faz-se cada vez mais necessária a quantificação dos efeitos gerados por esses processos. O hidrograma conceitual de Nash (1957) é um modelo de chuva-vazão que considera a bacia hidrográfica como um sistema linear que é função de dois parâmetros, sendo eles o número de reservatórios ( $n$ ) e a taxa de decaimento ( $k$ ). Como forma de avaliar as diferenças e comparar duas situações distintas, os valores desses parâmetros foram calculados para eventos de duas estações diferentes, a estação Itajubá no rio Sapucaí e a estação PCH Ninho da Águia Montante, localizada no rio Santo Antônio. Essas estações estão localizadas em Municípios vizinhos, sendo que o rio Santo Antônio é afluente do Sapucaí. Para a separação do escoamento foi utilizado o método de separação gráfica. Da totalidade dos eventos estudados, três foram descartados pelo fato de apresentarem resultados anormais para o estudo, sendo que a justificativa é que exista alguma perturbação na vazão medida que ocasionou esse problema. Os valores médios de  $n$  e  $k$  para a estação Itajubá foram de 8,63 e 15,81, respectivamente, enquanto para a estação PCH Ninho da Águia Montante esses mesmos valores foram 4,13 e 10,03. A média dos valores de  $R^2$  foram de 0,48 e 0,51, respectivamente, sendo considerado aceitável. Houve boa correlação entre os parâmetros  $n$  e  $k$  para as duas estações, sendo maior na de Itajubá. No que tange ao tempo de pico ( $t_p$ ), houve maior correlação deste com o parâmetro  $n$  na estação Itajubá, enquanto ocorreu o contrário quando se analisou a correlação entre a vazão de pico ( $Q_p$ ) e o parâmetro  $k$ . Os dados obtidos mostraram que a modelagem se mostrou eficiente e a aplicabilidade do modelo foi satisfatória.

**Palavras-chave:** Modelos hidrológicos; Escoamento superficial; Hidrologia Urbana.

### ABSTRACT

Bearing in mind that population growth, the advance of urbanization and anthropic action in natural environments have led to environmental impacts of different natures and that the waterproofing of these spaces can cause floods and decrease the quality of water, it is increasingly necessary the quantification of the effects generated by these processes. Nash's conceptual hydrograph (1957) is a rainfall-runoff model that considers the watershed as a linear system that is a function of two parameters, namely the number of reservoirs ( $n$ ) and the rate of decay ( $k$ ). As a way of evaluating the differences and comparing two different situations, the values of these parameters were calculated for events at two different stations, the Itajubá station on the Sapucaí river and the PCH Ninho da Águia Montante station, located on the Santo Antônio river. These stations are located in neighboring municipalities, and the Santo Antônio river is a tributary of the Sapucaí. For the flow separation, the graphic separation method was

used. Of all the events studied, three were discarded due to the fact that they presented abnormal results for the study, and the justification is that there is some disturbance in the measured flow that caused this problem. The average values of  $n$  and  $k$  for the Itajubá station were 8.63 and 15.81, respectively, while for the PCH Ninho da Águia Montante station these same values were 4.13 and 10.03. The average values of  $R^2$  were 0.48 and 0.51, respectively, being considered acceptable. There was a good correlation between the  $n$  and  $k$  parameters for the two stations, being higher in Itajubá. With regard to the peak time ( $t_p$ ), there was a greater correlation between this and the  $n$  parameter at the Itajubá station, while the opposite occurred when the correlation between the peak flow ( $Q_p$ ) and the  $k$  parameter was analyzed. The data obtained showed that the modeling was efficient and the applicability of the model was satisfactory.

**Keywords:** Hydrological models; Surface runoff; Urban hidrology.

## INTRODUÇÃO

A água é considerada um recurso natural renovável devido à sua capacidade de se renovar e se manter no seu ciclo. Porém esse recurso tem sido encontrado cada vez mais escasso, em qualidade e quantidade. Isso se deve a irregular distribuição espaço-temporal das chuvas, causada pela distribuição desbalanceada de radiação no planeta aliada a sazonalidade da mesma, além do consumo excessivo por diversas atividades antrópicas (agricultura, mineração, dessedentação e uso doméstico).

Segundo Torabi *et al.* (2018), o crescimento populacional, o desenvolvimento urbano e a industrialização das comunidades afetam negativamente a hidrologia da bacia, o que agrava as inundações, aumenta a poluição na corredeira, diminui o fluxo de base e reduz a nutrição das águas subterrâneas. O aumento dos níveis impermeáveis dessas áreas afetadas por essa tendência, reduziu seu nível permeável, que desempenha um papel importante na absorção de chuvas e, posteriormente, aumenta o volume total de escoamento. O resultado dessas alterações reduzirá o tempo de pico e aumentará a intensidade de inundações na área.

A noção de sustentabilidade, que remete a uma visão integrada entre ocupação e características do meio, indica que existe uma desconexão entre o planejamento urbano e a gestão dos recursos hídricos nos processos de urbanização, o que propicia a diminuição da quantidade e qualidade das águas nas cidades (OLIVEIRA *et al.*, 2019), sendo que um dos maiores impactos ambientais decorrentes do processo de urbanização (uso e ocupação do solo) se refere à impermeabilização do solo (FANTINATTI, 2011).

A urbanização, tanto da forma ordenada como desordenada e sem diretrizes de ocupação, impacta gravemente no ciclo hidrológico, pois causa drásticas alterações na drenagem, elevando a possibilidade de ocorrência de enchentes e deslizamentos, impondo riscos à saúde e a vida humana.

Portanto, é inegável a importância da previsão de vazões na operação contínua de sistemas de recursos hídricos destinados ao controle de cheias, seja no desenvolvimento de obras hidráulicas, como no planejamento e implantação de medidas não-estruturais (BARBOSA, 2001).

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi o de investigar o comportamento das vazões, vazões de pico e tempo de pico, em séries de precipitação e vazão em estações fluviométricas localizadas na região sul de Minas Gerais, onde já foram registrados eventos de enchentes. As bacias analisadas são as do rio Sapucaí e Santo Antônio.

Para a análise dos dados obtidos, a modelagem selecionada se referiu a aplicação do Hidrograma Conceitual de Nash, onde foram selecionadas estações em locais próximos geograficamente, porém em situações distintas quanto ao relevo, contribuição de vazão e ocupação urbana.

### **Caracterização da Área**

O critério para a seleção das estações se baseou na premissa de avaliar casos em que houvesse interferência do espaço urbano e casos mais a montante, com vazões menores e sem interferências significativas, como forma de fazer uma análise comparativa dos dados obtidos.

Sendo assim, a área de estudo está localizada na bacia do Alto Sapucaí, onde foram coletados dados de duas estações fluviométricas instaladas em duas cidades vizinhas, Itajubá e Delfim Moreira. A estação de Itajubá, com mesmo nome do Município, está localizada no próprio rio Sapucaí (que atravessa a cidade), enquanto a estação de Delfim Moreira fica localizada no rio Santo Antônio, afluente do rio Sapucaí, sendo denominada PCH Ninho da Água Montante.

O rio Sapucaí nasce a uma altitude de 1650 metros no município de Campos do Jordão, São Paulo, na Serra da Mantiqueira, e deságua entre as cidades de Três Pontas e Paraguaçu, Minas Gerais, no lago de Furnas a aproximadamente 780 metros (CBHRS, 2010). Ele atravessa toda cidade de Itajubá.

Já o rio Santo Antônio é formado pela convergência dos ribeirões do Rosário e Machado, no próprio município de Delfim Moreira e segue seu fluxo até Itajubá. As figuras 8 e 9 mostram a localização da área de estudo.

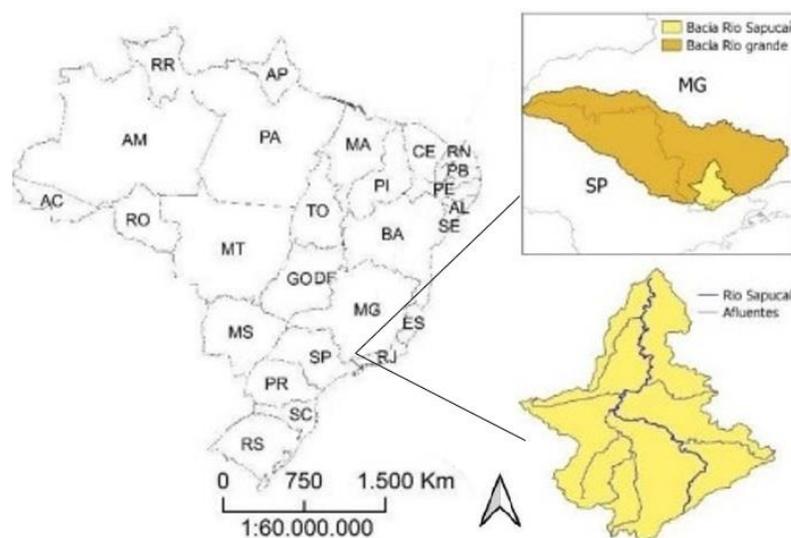
Com uma população de estimada em 97 mil habitantes, o município de Itajubá está situado na Serra da Mantiqueira, no sul do estado de Minas Gerais, atingindo uma altitude de 1746 metros no seu ponto mais alto e 830 no ponto mais baixo. Sua área urbana encontra-se a

uma altitude média de 842 metros. Apresenta como principais atividades econômicas a indústria e o setor de serviços (IBGE, 2021). O clima é típico de monção, com estação chuvosa entre outubro e março (ALVES, MARTINS & REBOITA, 2020). A estação Itajubá (Código 6127100), por sua vez, se localiza na latitude -22,5548 e longitude -45,4242, em uma altitude de 849 metros. Possui uma área de drenagem de 869 km<sup>2</sup> (ANA, 2022).

Já Delfim Moreira é uma pequena cidade com cerca de 8 mil habitantes (IBGE,2021), sendo que as principais atividades econômicas são o turismo rural e ecológico, além da agricultura. De acordo com Mensah *et. al* (2018), o clima de Delfim Moreira se encaixa na classificação de Köppen como Cwb – clima temperado úmido com invernos secos e frios suscetíveis à fortes geadas devido à altitude da Serra da Mantiqueira e verões mornos, com estações secas e chuvosas bem definidas. Ainda segundo Mensah *et. al* (2018), o município apresenta uma pluviosidade anual entre 1.350 a 1.500 mm em toda sua parte mais alta, enquanto na mais baixa há uma variação em torno de 1.200 a 1.350 mm.

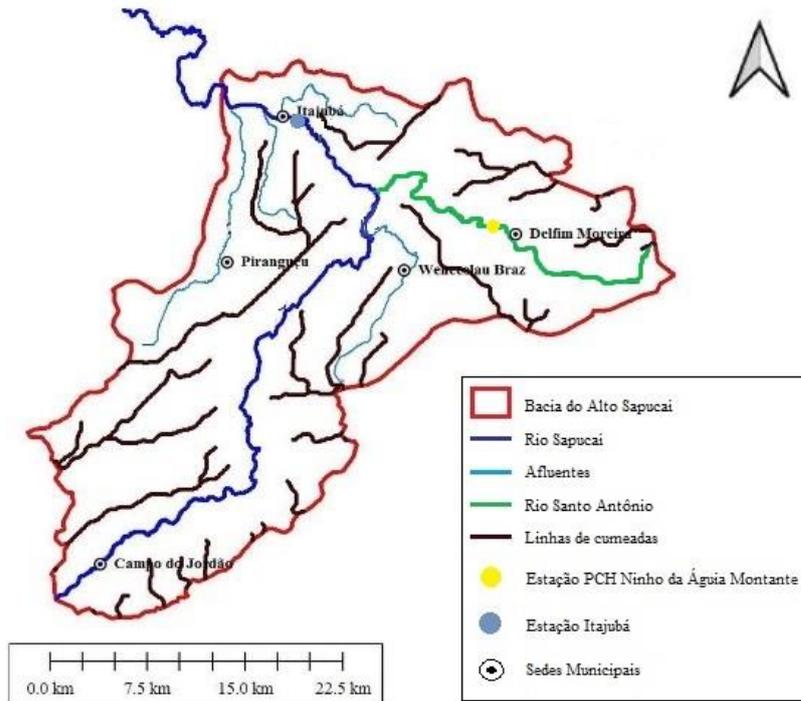
A estação PCH Ninho da Águia Jusante (Código 61268700), se localiza na latitude -22,4492 e longitude -45,3139, estando a 1200 metros de altitude. Possui uma área de drenagem de 126 km<sup>2</sup> (ANA, 2022).

Figura 8 – Localização da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 9 – Localização das estações estudadas



Fonte: Adaptado de MARCIANO, BARBOSA & SILVA (2017).

## METODOLOGIA

Após selecionadas as estações do estudo foi realizada a separação dos eventos. Na separação buscou-se dados, em grande maioria de períodos chuvosos, onde houvesse uma maior possibilidade de encontrar eventos de precipitação bem definidos. A separação do escoamento superficial foi feita através do método de separação gráfica.

### Modelagem Chuva-Vazão

A modelagem chuva-vazão para fins desse trabalho contemplou o Método Racional e Hidrograma de Nash.

O método racional relaciona as variáveis apresentadas na Equação (1), a fim de se encontrar a vazão máxima de escoamento em uma seção de controle.

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}, \quad (1)$$

onde  $C$  é o coeficiente de escoamento superficial [adimensional],  $i$  é a intensidade da precipitação [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ],  $A$  é a área da bacia de estudo [ha], e 360 é um fator de conversão de unidades que faz com que a vazão esteja na unidade de [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Entretanto, sabe-se que  $i$  pode ser calculado por equações de intensidade, duração e frequência (IDF) e também pela Equação (2).

$$i = \frac{PT}{t}, \quad (2)$$

em que  $PT$  é a precipitação total do evento estudado [mm] e  $t$  é a duração total do evento estudado [h]. Substituindo a Equação (2) na Equação (1), temos a Equação (3).

$$Q = \frac{C \cdot PT \cdot A}{t \cdot 360}, \quad (3)$$

Isolando o coeficiente de escoamento superficial da Equação (3), temos a Equação (4).

$$C = \frac{Q \cdot t \cdot 360}{PT \cdot A}, \quad (4)$$

sendo que obtenção do parâmetro  $C$  é necessária para o cálculo dos valores de precipitação efetiva dos eventos.

### **Hidrograma Conceitual de Nash**

Para Nash (1957), o escoamento superficial direto em uma bacia considera uma precipitação uniforme ao longo da mesma até a respectiva seção de controle. Essa bacia é composta por  $n$  reservatórios que simulam uma situação de amortização de pico e outra de translação, ou seja, um movimento de ondas cujo efeito é mais pronunciado em canais ao longo da bacia. O parâmetro  $k$  significa a taxa de decaimento, refletindo a resposta da bacia ao ser condicionada por um ou mais eventos de precipitação efetiva.

Com isso, para estimar os parâmetros  $n$  e  $k$  Nash (1957) demonstrou que, para um sistema linear invariante no tempo, as seguintes relações são válidas:

$$m1(\text{HCN}) = m1S - m1E, \quad (5)$$

$$m2(\text{HCN}) = m2S - m2E, \quad (6)$$

em que  $m1(\text{HCN})$  e  $m2(\text{HCN})$  são os primeiro e segundo momentos do HCN;  $m1S$  e  $m2S$  são os primeiro e segundo momentos do hidrograma de saída (vazão);  $m1E$  e  $m2E$  são o primeiro e o segundo momentos do hidrograma de entrada (precipitação), ou seja:

$$m1S = \frac{\sum Q_i t_i}{\sum Q_i} \quad (7)$$

$$m2S = \frac{\sum Q_i t_i^2}{\sum Q_i} - m1S^2 \quad (8)$$

$$m1E = \frac{\sum P_i t_i}{\sum P_i} \quad (9)$$

$$m2E = \frac{\sum P_i t_i^2}{\sum P_i} - m1E^2 \quad (10)$$

Introduzindo-se esses termos nas Equações (11) e (12) tem-se:

$$k = \frac{m2S - m2E}{m1S - m1E} \quad (11)$$

$$n = \frac{(m1S - m1E)^2}{m2S - m2E} \quad (12)$$

Tomando-se dois reservatórios diferentes em série, com constantes “ $k_1$ ” e “ $k_2$ ”, a saída do primeiro é a entrada do segundo, com a integral defasada de um intervalo de tempo ( $t$ ), proporcionando o Hidrograma Unitário Instantâneo, aqui chamado de Hidrograma Conceitual de Nash (HCN), cuja equação geral é:

$$u(0, t) = \int_{t=0}^{t=t} \frac{1}{k_1} e^{\tau/k_1} \cdot \frac{1}{k_2} e^{-(t-\tau)/k_2} d\tau, \quad (13)$$

resolvendo-se a integral da Equação (13) e se considerando dois reservatórios iguais, obteremos:

$$u(0, t) = \int_0^t \frac{1}{k^2} \exp\left(-\frac{t}{k}\right) d\tau, \quad (14)$$

$$u(0, t) = \frac{t}{k^2} \cdot \left(e^{-\frac{t}{k}}\right), \quad (15)$$

Para três reservatórios:

$$u(0, t) = \frac{t^2}{2 \cdot k^3} \cdot \left(e^{-\frac{t}{k}}\right), \quad (16)$$

Generalizando:

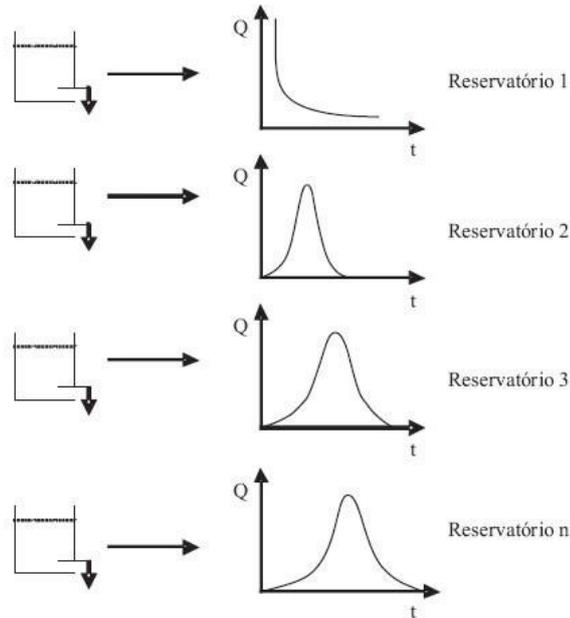
$$u(0, t) = \frac{t^{n-1}}{k^n \cdot (n-1)!} \cdot e^{-t/k}, \quad (17)$$

A Equação (17) pode ser representada, genericamente, da seguinte forma:

$$u(0, t) = \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot \frac{e^{-t/k}}{k \cdot \tau(n)}, \quad (18)$$

A Equação (18) é conhecida como modelo conceitual de Nash para HCN, que é a forma analítica do modelo e idêntica à função densidade de probabilidade (FDP) Gama, considerando-se “n” reservatórios lineares representando a situação esquematizada na Figura 10.

Figura 10 – Representação esquemática do modelo de Nash para  $n$  reservatórios



Fonte: SILVA *et al.* (2008, p. 260).

A determinação da vazão  $Q(t)$ , como função dos parâmetros  $n$  e  $k$ , é realizada por meio da equação de convolução do HCN, considerando-se primeiro a precipitação unitária, gerando as ordenadas do Hidrograma Unitário (HU) pela integração do HCN:

$$h(t) = \int_0^1 \frac{1}{k} \left(\frac{t-\tau}{k}\right)^{n-1} \cdot \frac{e^{-(t-\tau)/k}}{\tau(n)} d\tau, \quad (19)$$

Esta integral pode ser resolvida numericamente utilizando-se a regra de Simpson. Subdividindo-se o intervalo (0,1) em “m” intervalos, teremos:

$$ht = \frac{D}{3} \cdot (y_1 + 4y_2 + 2y_3 + \dots + 2y_{m-1} + 4y_m + y_{m+1}) \quad (20)$$

em que cada ordenada  $y$  do HU é obtida pela solução da função dentro da integral, para um valor de  $t-\tau$ ;  $D$  - passo de integração. O hidrograma de cheia é obtido aplicando-se novamente a equação de convolução, na forma matricial, da seguinte forma:

$$[Q] = [h(t)] \cdot [Pe] \quad (21)$$

em que [Q] é a matriz do hidrograma de cheia; [h(t)] é a matriz de ordenadas do HU e [Pe] é a matriz de precipitações efetivas considerando-se a precipitação unitária igual a 1 mm. A Figura 11 ilustra as matrizes a serem construídas para se encontrar HU.

Figura 11 – Matrizes de escoamento superficial (a) e precipitação efetiva (b)

$$\text{a) } \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_M \end{bmatrix} \quad \text{b) } \begin{bmatrix} P_1 & 0 & & & \\ P_1 & P_1 & & & \\ \vdots & P_2 & & & \\ P_N & \vdots & \dots & & \\ 0 & P_N & & & \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & & & P_N \end{bmatrix}_{N \times (M-N+1)}$$

Fonte: INNOCENTE (2016, p. 69).

Para estimar o valor de Q é necessário fazer a convolução dessas duas matrizes, onde o resultado fornecerá a matriz resultante de vazão estimada. A Figura 12 ilustra um exemplo de convolução em forma matricial com três pulsos de precipitação efetiva.

Figura 12 – Convolução na forma matricial

$$\begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_2 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_3 & P_2 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_3 & P_2 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & P_2 & P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_3 & P_2 & P_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 & P_2 & P_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 & P_2 & P_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 & P_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} HU_1 \\ HU_2 \\ HU_3 \\ HU_4 \\ HU_5 \\ HU_6 \\ HU_7 \\ HU_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1HU_1 \\ P_1HU_2 + P_2HU_1 \\ P_1HU_3 + P_2HU_2 + P_3HU_1 \\ P_1HU_4 + P_2HU_3 + P_3HU_2 \\ P_1HU_5 + P_2HU_4 + P_3HU_3 \\ P_1HU_6 + P_2HU_5 + P_3HU_4 \\ P_1HU_7 + P_2HU_6 + P_3HU_5 \\ P_1HU_8 + P_2HU_7 + P_3HU_6 \\ P_2HU_8 + P_3HU_7 \\ P_3HU_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ Q_7 \\ Q_8 \\ Q_9 \\ Q_{10} \end{bmatrix}$$

Fonte: INNOCENTE (2016, p. 30).

### Análise do Hidrograma Conceitual de Nash

Para se analisar o ajuste do Hidrograma Conceitual de Nash com o ajuste do Hidrograma Unitário Experimental, será utilizada a curva entre a vazão simulada e a vazão observada, e assim observar se a regressão (Equação 22) apresentou resultados satisfatórios. Esse procedimento foi utilizado com os hidrogramas obtidos dos dados do Hidroweb.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^M (Q_{OBSI} - Q_{ESTI})^2}{\sum_{i=1}^M (Q_{ESTI} - \bar{Q})^2} \quad (22)$$

sendo  $Q_{obs}$  a vazão observada,  $Q_{est}$  a vazão estimada pelo modelo,  $\bar{Q}$  a vazão média observada e  $m$  o número de dados do evento considerado.

O coeficiente  $R^2$  de Nash e Sutcliffe pode variar a partir de negativo infinito até 1, sendo 1 um ajuste perfeito. O valor de desse é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, razão pela qual, quando é próximo de 1, o modelo está obtendo um bom ajuste para as cheias. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de  $R^2$  supera 0,75 e é considerado aceitável se esse valor fica entre 0,36 e 0,75 (COLLISCHONN, 2001).

Os cálculos, tabelas e gráficos foram elaborados a partir do *Microsoft Excel*.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos foram separados por estações. Na estação Itajubá foram selecionados ao final 11 eventos, enquanto na estação PCH Ninho da Águia Montante foram 10, conforme apresentados nas Tabelas 1 e 2. A separação dos eventos chuva-vazão mostrou-se bastante trabalhosa. Semelhante ao que foi identificado por Pádua (2015), nesse trabalho os dados disponíveis para as estações fluviométricas, mesmo que em volumes apreciáveis em número de registros, apresentaram muitas falhas, em alguns casos até mesmo de meses e anos inteiros, o que reduziu a quantidade de eventos utilizados. Além disso, não se obteve dados mais antigos para se fazer uma melhor comparação do regime de precipitações e vazões ao longo dos anos. Moura *et al.* (2019), por sua vez, conseguiram uniformizar os intervalos de tempo em seu estudo, utilizando intervalos iguais de 30 minutos para os 20 eventos estudados.

Com relação a Tabela 1, o evento 2 apresenta valores de deflúvio superficial e precipitação efetiva muito baixos, o que compromete a análise dos dados para esse evento. Isso se deve ao fato de que nesse período, apesar de ter ocorrido alguns eventos de precipitação, a estação apresentou falhas, não sendo possível a coleta de outros dados de chuva. Quanto ao evento 5, os resultados mostraram valores negativos para os parâmetros  $n$  e  $k$ . Isso pode ser explicado por algumas razões. O rio Sapucaí possui afluentes a montante, inclusive PCH (pequena central hidrelétrica) e foram observados acréscimos de vazões maiores que as chuvas registradas no local. A mesma situação aconteceu nos eventos 3, 8, 9 e 11, indicando interferência de outras contribuições de vazão diferentes da precipitação medida nessa área da bacia.

Tabela 1 – Resumo dos dados Estação Itajubá

5-61271000-ITAJUBÁ													
Área de Drenagem = 869 km <sup>2</sup>													
Evento	Data	$\Sigma P$ (mm)	C	$\Sigma Q_s$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Sigma P_e$ (m <sup>3</sup> /s)	n	k	n*k	n médio	k médio	n*k médio	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> médio
1	Dez/2019	15,20	0,0260	381,30	381,30	5,28	22,96	121,23				0,5294	
2	Jan/2020	15,80	0,0001	2,22	2,22	3,28	2,72	8,92				-0,0541	
3	Fev/2020	69,80	0,1100	7418,00	7418,00	4,30	20,76	89,27				0,6756	
4	Mar/2020	25,20	0,0382	928,30	928,30	2,56	30,50	78,08				0,5264	
5	Dez/2020	109,20	0,4043	4262,69	4262,69	-0,72	-102,42	73,74				---	
6	Fev/2021	25,00	0,0270	621,20	651,20	13,06	6,63	86,58	7,29	3,87	85,05	0,5863	0,42
7	Out/2021	73,60	0,0105	747,15	747,15	9,16	12,83	117,52				0,5648	
8	Dez/2021	73,40	0,0028	5696,85	5696,85	7,61	16,74	127,39				-0,0254	
9	Jan/2022	26,40	0,1875	4779,81	4779,81	21,94	3,18	69,77				0,3741	
10	Fev/2022	9,60	0,0432	400,13	400,13	2,57	18,32	47,08				0,8570	
11	Mai/2022	22,20	0,0496	1062,59	1062,59	11,2	10,35	115,92				0,2030	

$\Sigma P$  - Quantidade de precipitação do evento (mm) n - número de reservatórios  
C - Coeficiente de escoamento superficial k - taxa de decaimento  
 $\Sigma Q_s$  - Somatório de deflúvio superficial do evento (m<sup>3</sup>/s) R<sup>2</sup> - Coeficiente de Nash e Sutcliffe  
 $\Sigma P_e$  - Somatório de precipitação efetiva do evento (m<sup>3</sup>/s)

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

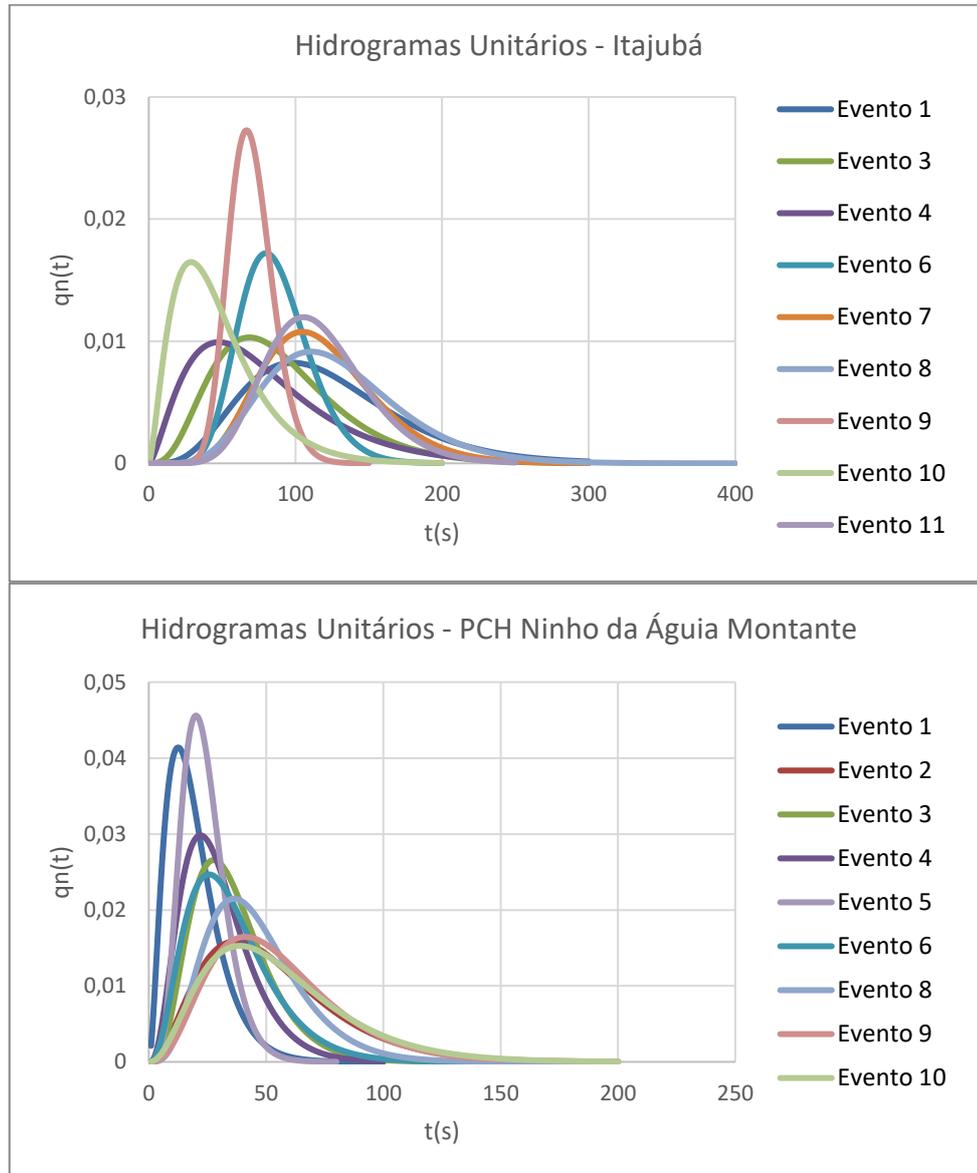
Quanto aos valores do coeficiente R<sup>2</sup>, a maioria dos eventos apresentou valores aceitáveis (entre 0,30 e 0,70), sendo somente o evento 10 considerado bom. Não foi calculado o valor de R<sup>2</sup> para o evento 5, devido ao fato de não ter sido possível a obtenção do vetor de escoamento superficial pela função gama e, por conseguinte, não foi realizada a convolução. Os eventos 2 e 8 apresentaram valores de R<sup>2</sup> negativos. Silva *et al.* (2008) observaram comportamento similar em seu trabalho quando analisaram alguns hidrogramas estimados pelo valor médio de *n* e *k* e afirmam que este comportamento se deve ao fato do modelo ter produzido maior translação do hidrograma estimado em relação ao observado, fazendo com que houvesse um valor elevado no numerador do coeficiente da expressão (equação 22). Mediante a esses fatores, os eventos 2 e 5 foram descartados.

Já de acordo com a Tabela 2, o evento 5 apresentou valores muito baixos de deflúvio superficial e precipitação efetiva semelhante ao evento 2 citado acima. Isso se deve à baixa precipitação registrada no período e não interferiu nas etapas subsequentes.

Em geral, os dados obtidos não apresentaram anormalidade, com exceção do evento 7, onde o valor de *n* foi menor que 1.



Gráfico 1 – Resumo dos hidrogramas unitários obtidos



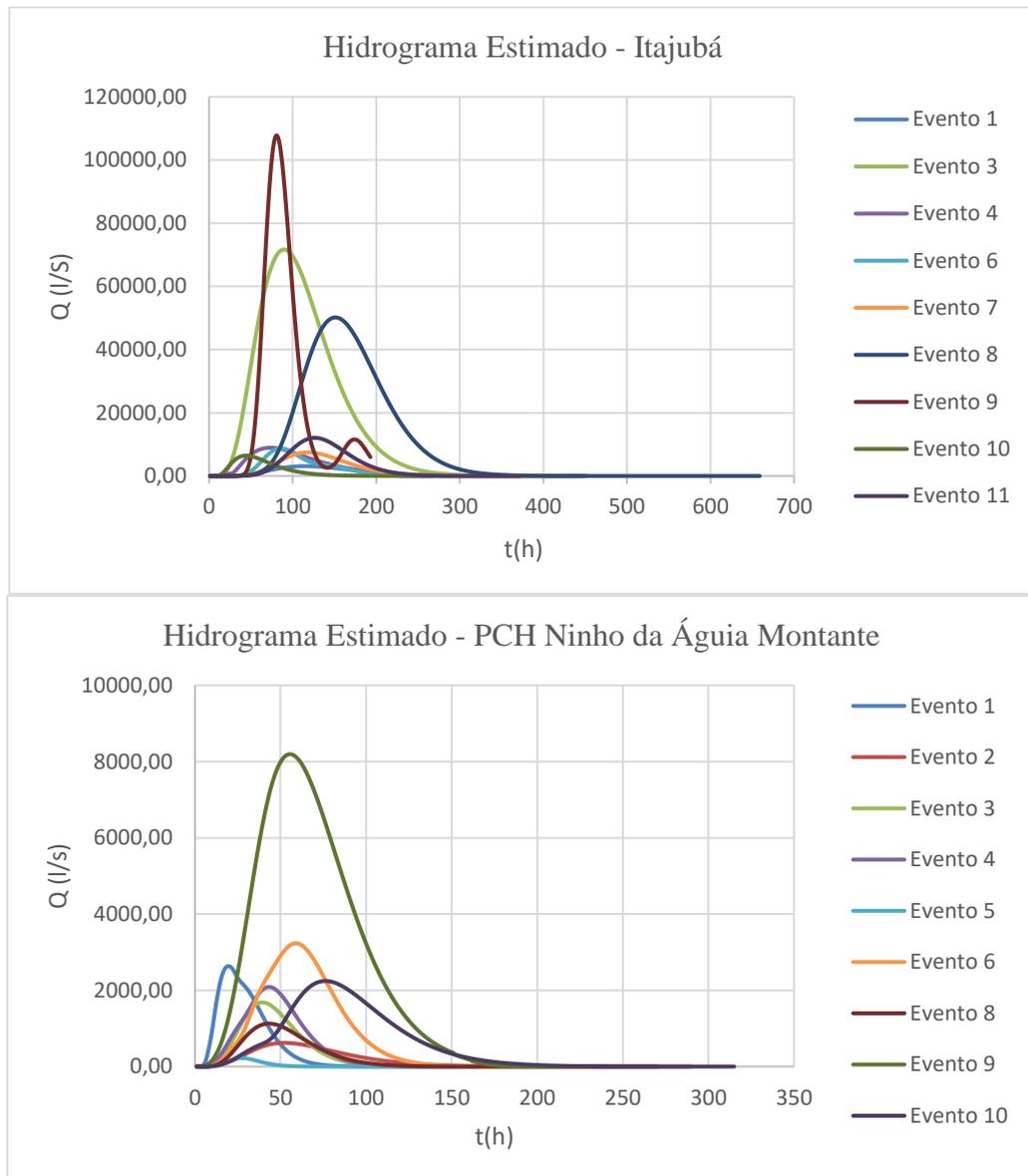
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os hidrogramas apresentados no Gráfico 1 mostram um comportamento diferente para cada uma das estações estudadas. No que tange à estação Itajubá, os hidrogramas confeccionados demonstraram maiores oscilações e dispersão entre si, o que está relacionado às variações de vazão apresentadas na Tabela 1. Por outro lado, na estação PCH Ninho da Águia Montante, os hidrogramas apresentam formatos mais achatados, com menos espaçamento entre si, caracterizando uma situação de maior uniformidade no regime de vazões. Além disso, nessa estação também foram observados valores de vazões maiores do que na estação Itajubá.

No Gráfico 2 estão apresentados os hidrogramas estimados através da convolução para os nove eventos considerados de cada estação. Os valores de  $Q_{est}$  nos eventos analisados mostram que na estação Itajubá há mais eventos com a vazão de pico elevada e há também um

comportamento similar ao observado no Gráfico 1, onde as curvas para a estação PCH Ninho da Águia Montante estão menos dispersas entre si. Esse fato também pode ser justificado devido às interferências de vazões a montante da estação Itajubá. Verificou-se também uma relação direta entre os maiores valores de  $Q_{obs}$  e os valores de  $Q_{est}$  apresentados no gráfico, mostrando que a modelagem se mostrou eficiente.

Gráfico 2 – Resumo dos hidrogramas estimados pela convolução

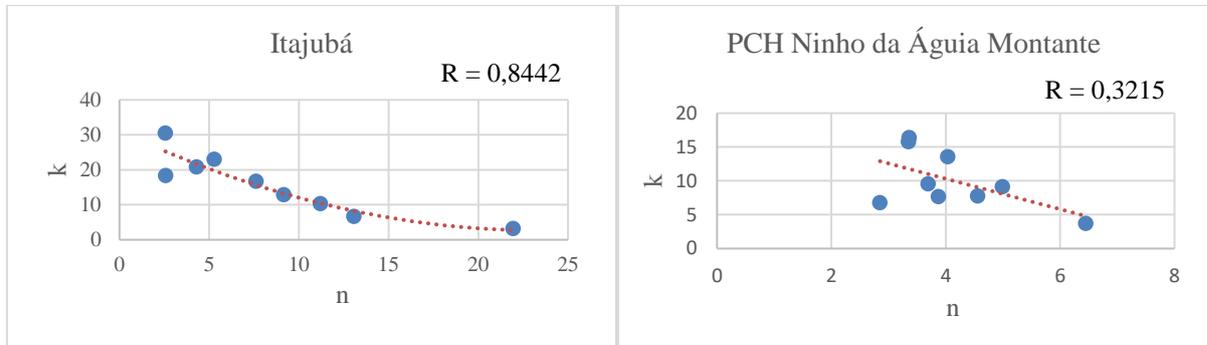


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para o cálculo dos valores médios de  $n$  e  $k$  apresentados nas Tabelas 1 e 2, foram considerados os eventos descartados nas estações Itajubá (2 e 5) e PCH Ninho da Águia Montante (7). Após o descarte desses eventos, os valores médios de  $n$ ,  $k$  e  $n*k$  para estação de Itajubá foram para 8,63, 15,81 e 94,76, respectivamente. Enquanto que para a estação PCH Ninho da Águia Montante foram para 4,13, 10,03 e 39,04, respectivamente. Conforme

apresentado no Gráfico 3, para o caso de Itajubá pôde-se notar uma forte correlação entre  $n$  e  $k$ , com valor de  $R$  igual a 0,8442. Já no caso da PCH Ninho da Águia Montante, a correlação foi menor, de 0,3215.

Gráfico 3 – Correlação  $n \times k$

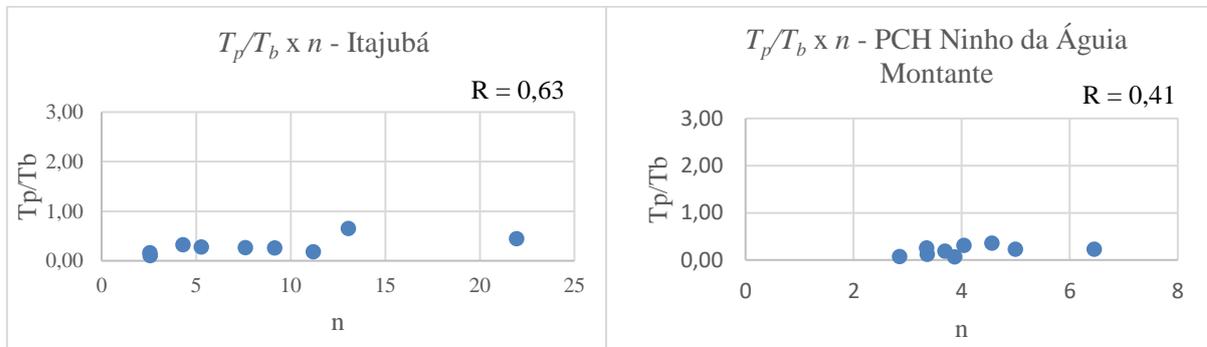


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Terra (2021) observou uma correlação  $n \times k$  de 0,8338 para 42 eventos na Bacia do rio Santana, valor parecido com o observado na estação Itajubá para 9 eventos.

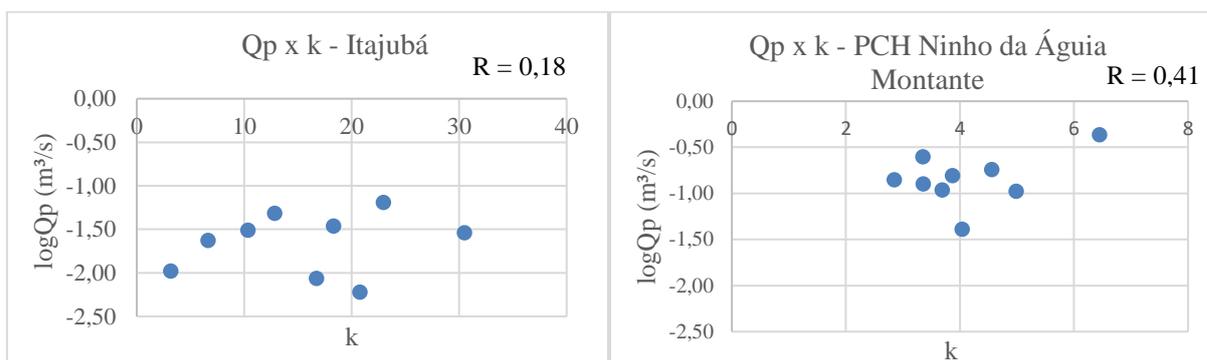
A análise da influência do parâmetro  $n$  no tempo de pico ( $t_p$ ) mostra que, a estação de Itajubá apresenta melhor correlação ( $R$  mais próximo de 1) do que na PCH Ninho da Águia Montante.

Gráfico 4 – Influência do parâmetro  $n$  no tempo de pico ( $t_p$ )



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nash (1957) destaca que há influência direta também do parâmetro  $k$  na vazão de pico ( $Q_p$ ). O Gráfico 4 mostra que essa influência se mostrou mais presente para a estação PCH Ninho das Águias Montante, com valor de do coeficiente de Pearson ( $R$ ) igual a 0,41, enquanto que para estação de Itajubá, o valor de  $R$  obtido foi de 0,18. Esse fenômeno pode estar ligado a ação de outras contribuições na vazão medida, que não seja a precipitação propriamente dita, para o caso de Itajubá.

Gráfico 5 – Influência do parâmetro  $k$  na vazão de pico ( $Q_p$ )

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

É válido ressaltar que a correlação entre os parâmetros  $n$  e  $k$  e  $n$  e  $t_p$  foram maiores na estação de Itajubá, enquanto ocorreu o contrário na estação da PCH Ninho da Águia Montante, sendo a correlação  $k$  e  $Q_p$  maior para esse caso.

Innocente (2016) encontrou correlação entre  $n$  e  $t_p/t_b$  com Pearson igual a 0,84 para o método de distribuição de precipitação efetiva proporcional.

Ainda segundo Innocente (2016), as premissas do modelo de Nash estão relacionadas ao fato do parâmetro número de reservatórios interferir diretamente no tempo de pico e a taxa de decaimento interferir diretamente na vazão de pico.

Terra (2021) afirma que um ponto a se considerar é que a essa modelagem subestima  $Q_p$  e superestima  $t_p$ . Isso pode ser comprovado através dos gráficos 3 e 4, quando para estação Itajubá, onde foram medidas as maiores vazões, a correlação entre o parâmetro  $k$  e  $Q_p$  é menor.

Como limitações do modelo, Singh (1988) as descreve como sendo o fato do valor de que o parâmetro  $n$ , que idealmente deveria ser um número inteiro, ser na prática um valor fracionário e também o fato que o modelo ignora o conceito de translação, essencial para descrever o comportamento de um sistema dinâmico, e assume um coeficiente de armazenamento  $k$  uniforme para derivar a saída da bacia.

Silva *et al.* (2008) concluíram em seu trabalho que a análise de sensibilidade dos parâmetros  $n$  e  $k$  propiciou melhoria na performance do modelo de Nash, mostrando que o método dos momentos, que também fora usado nesse trabalho, pode não produzir as melhores estimativas para esses parâmetros.

Portanto, comparações com outros métodos e modelos se mostram interessantes como forma de continuidade desse estudo.

## CONCLUSÃO

Os dados coletados na estação de Itajubá mostraram que há contribuições de vazão a montante não ligadas diretamente a precipitação medida. Por se tratar de uma área com maior interferência antrópica e do aparelho urbano, pode existir uma propensão maior ao escoamento superficial e menor à infiltração, ocasionando aumento do deflúvio superficial.

Aumentos abruptos de vazão foram identificados nas séries históricas selecionadas. Esse fato pode estar relacionado com perturbações diversas, como reservatórios e/ou comportas de hidrelétricas a montante.

Os dados coletados na estação PCH Ninho da Águia Montante mostraram menor variabilidade tanto na intensidade das precipitações, quanto nas vazões. Fato esse que pode ser explicado pela sua área de drenagem (126 km<sup>2</sup>) e sua localização mais a montante do rio Santo Antônio, mais próximo a áreas de nascente.

A área urbanizada que antecede a estação da PCH Ninho da Águia é menor que a de Itajubá, tanto pela localização, quanto pela população das cidades onde estão localizadas, podendo ser objeto de novos estudos a fim de se investigar se a interferência do processo urbanizatório pode ter impactado no regime de precipitações e vazões.

Desconsiderando os eventos que foram descartados, o valor de R<sup>2</sup> médio foi de 0,48 para os eventos da estação Itajubá e 0,51 para PCH Ninho da Águia Montante, sendo a média considerada aceitável.

Existe um efeito maior no tempo de pico ( $t_p$ ) nos dados da estação Itajubá e maior na vazão de pico ( $Q_p$ ) na estação PCH Ninho da Águia Montante.

A aplicação da metodologia se mostrou correta em todas as etapas, valendo analisar apenas se os resultados foram adequados para tal.

## **BIBLIOGRAFIA**

ALVES, A. M. de M. R.; MARTINS, F. B.; REBOITA, M. S. Balanço hídrico climatológico para Itajubá-MG: Cenário atual e projeções climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano 16 – Vol. 26 – JAN/JUN 2020.

BARBOSA, A. M.; FILL, H. D. Modelo de Previsão de Vazão Baseado no Hidrograma Unitário. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 6 n.4 Out/Dez 2001, 165-174.

CBHRS. 2010. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. Disponível em: <https://www.cbhsapucaí.org.br/Pagina.do?idSecao=53.html>. Acesso em: 26 fev. 2023

COLLISCHONNM W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia). Porto Alegre: UFRGS, 2001. 194p.

COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. Resumo Executivo**. Belo Horizonte: COPASA, 2010. 245 p.

FANTINATTI, P. A. P. **Abordagem MCDA como ferramenta de mudança de paradigma no planejamento dos recursos hídricos**. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. 2011. 399p.

INNOCENTE, C. **Uma abordagem de sistemas lineares no processo chuva-vazão de uma sub-bacia do rio dos Bugres**. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2016. 131 p.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. Cálculo da Precipitação media utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. **Revista Ambient. Água**, vol. 13, n. 1, e1906 - Taubaté 2018.

MENSAH, J. H. R.; LIMA, R. H. de S.; PONS, N. A. D. Mapeamento das áreas de preservação permanentes (APPs) na bacia hidrográfica do ribeirão do Rosário em Delfim Moreira (MG): Um subsídio à preservação ambiental. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.7, n.4, p.441-451, 2018.

OLIVEIRA, A. N.; KOIDE, S.; COSTA, M. E. L.; BEZERRA, M. C. L. Padrões urbanos facilitadores a recarga dos aquíferos. **Revista Morfológica Urbana**, v. 7, n. 2, 10p. 2019.

SILVA, P. M. de O., MELLO, C. R. de, SILVA, A. M. da; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 12(3), 258-265. 2008.

SINGH, V.P., 1987. On application of the Weibull distribution in hydrology. **Water Resources Management**, 1, 33–43. doi:10.1007/BF00421796.

TERRA, T. A. **Análise do processo chuva-vazão utilizando o hidrograma unitário conceitual de Nash na bacia hidrográfica do Rio Santana**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas, 2021. 49 p.

TORABI, S. A.; SEDGHI, H.; PORCHEMMAT, J. & BABAZADEH H. (2018) The Simulation of Flood Hydrograph in Natural and Urban Basins. **Open Journal of Geology**, 8, 641-646

## 4 CONCLUSÃO

Por meio do estudo realizado foi possível avaliar que modelagem pode ser considerada aceitável, com resultados mais favoráveis para a estação PCH Ninho da Águia Montante, mesmo que a correlação entre os parâmetros de Nash tenha sido maior para a estação Itajubá. Isso se deve ao fato de que esta possui menor perturbação a montante e está em uma área com menor ocupação.

É importante frisar que, apesar de poucos eventos estudados, a separação destes foi bastante trabalhosa. Os dados disponíveis apresentaram muitas falhas de registros, em alguns casos de até meses e anos. Além disso, não foi encontrado para os casos estudados, séries mais antigas, até mesmo para avaliar melhor comportamentos de vazão e precipitação ao longo do tempo. Isso impactou na escolha do objeto de estudo, pois algumas estações tiveram que ser descartadas pela falta de dados.

Os intervalos de tempo dos eventos também podem ser objeto de estudo, uma vez que para esse trabalho foram utilizados eventos com medições variadas entre 15 minutos e 1 hora, haja visto que nas estações não havia nenhuma uniformidade de tempo para os dados de precipitação e vazão.

As águas do rio Sapucaí recebem contribuição a montante de seus afluentes, bem como lançamentos de outras naturezas (o que não é objeto desse estudo), enquanto o rio Santo Antônio possui pouca interferência à montante.

Como sugestão, outros métodos de cálculo dentro do modelo proposto ou até mesmo modelos diferentes considerando outros parâmetros, como por exemplo parâmetros geomorfológicos ou até mesmo uma abordagem mais voltada aos impactos da ocupação urbana na região poderiam ser utilizados de forma a avaliar a influência do processo chuva-vazão nas estações estudadas e comparar os dados obtidos.

## REFERÊNCIAS

- ADIB, A.; SALARIJAZI, M.; VAGHEFI, M.; SHOOSHTARI, M. M. e AKHONDALI, A. M., Comparison between GcIUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH and Nash-IUH models, **Turkish J. Eng. Env. Sci.**, 34, 91 – 103. 2010.
- AGIRRE, U.; GOÑI, M.; LÓPEZ, J. J.; GIMENA, F. N. Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. **Journal of Hydrology**, v.64, n.2/3, p.321-322, 2005.
- ALMEIDA, T. A. **Impactos decorrentes das mudanças ocasionadas pelo uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica urbana da UFJF – campus JF sobre o escoamento superficial.** Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Juiz de Fora. 2016. 79 p.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, **Conjuntura de Recursos Hídricos no Brasil, 2021.** Disponível em: [https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura\\_2021\\_pdf\\_final\\_revdirec.pdf](https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf). Acesso em: 14 out 2022.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, Portal Hidroweb, <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 09 ago. 2022.
- BARBOSA, A. M.; FILL, H. D. Modelo de Previsão de Vazão Baseado no Hidrograma Unitário. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** Volume 6 n.4 Out/Dez 2001, 165-174.
- BARBOSA, L. S. **Modelagem chuva-vazão: Uma proposta metodológica à análise do coeficiente de abstração inicial do Método Curva.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas, 2021. 63 p.
- BASTOS, P. C. **Efeitos da urbanização sobre as vazões de pico de enchente.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, 2009. 136p.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. 1993. Precipitação. In: TUCCI, C. E. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: Editora da Universidade. cap. 5, pp 177-241.
- BHASKAR, N. R.; PARIDA, B. P. e NAYAK, A.K., Estimativa de cheias para bacias hidrográficas não calibradas usando o HUIG, J. **Planeamento e Gestão de Recursos Hídricos**, 123, 228-238, 1997.
- BRITTO, M.; BAPTISTA, G. M. De M; LIMA, E. A. O estudo dos componentes do ciclo hidrológico desde métodos tradicionais até o uso de sensoriamento remoto: uma revisão. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, Paranoá 23, p. 127-146., 2019.
- CHOW, V. T. Applied Hydrology, **McGraw Hill Book Company**, New York, 1988.
- CHUI, T. F. M.; TRINH., D. H. Modelling infiltration enhancement in a tropical urban catchment for improved stormwater management. *Hydrological Processes*, [s.l.], p.4405-4419, 2016. Wiley.

- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. Ed. Edgard Blucher Ltda e EDUSP. 149 p. 1974.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. Ed. 1. São Paulo: Edgard Blucher, p.1-233, 1999.
- CUOMO, S.; DELLA SALA, M. Rainfall-induced infiltration, runoff and failure in steep unsaturated shallow soil deposits. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 162, p.118-127, 2013.
- DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). EESC/USP. São Carlos – SP. 2021. 177 p.
- FENDRICH, R. **Modelação de hidrogramas multi-modais**. Dissertação Mestrado (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). EESC/USP. São Carlos – SP. 1984. 174p.
- GARCIA, J. I. B., 2005. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. 168 p.
- HAUGHTON G; HUNTER C. Sustainable cities. London: Jessica Kingsley Publishers and Regional Studies Association; 1994. 357 p. **Regional Policies and Development Series** n. 7.
- HERNANDEZ, L. C.; SZIGETHY, L. Controle de Enchentes: Exemplo do uso da tecnologia e inovação para o controle de enchentes. **Artigo**. IPEA, 2020.
- INNOCENTE, C. **Uma abordagem de sistemas lineares no processo chuva-vazão de uma sub-bacia do rio dos Bugres**. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2016. 131 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Estimativas da população. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html>. Acesso em 15 out. 2022.
- KARNIELE, A.; ASHER, J. B. A daily runoff simulation in semi-arid watersheds based on soil water deficit calculations. **Journal of Hydrology**, n. 149, p. 9-25. 1993.
- LEAL, A. C. Gestão urbana e regional em bacias hidrográficas: interfaces com o gerenciamento de recursos hídricos. In: BRAGA, R.; CARVALHO, P. F. de. (Org.). **Recursos hídricos e planejamento urbano e regional**. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2003. p. 65-85.
- LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicado ao manejo de bacias hidrográficas**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 245p.
- MAIA, A. L.; AMARAL, I. R.; VERSIANI, B. R. (2006). Metodologia DPFT de identificação do hidrograma unitário e das precipitações efetivas: Estudo de caso para a bacia hidrográfica de Juatuba – MG. **RBRH Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, V.11 n.1, 79-90.

MELO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.4, p.410-419, 2007.

MENEZES, C. R.; SALGADO, C. M. Caracterização morfométrica e de interações urbanas na bacia hidrográfica do rio Imboáçu (São Gonçalo, RJ): contribuição ao estudo de inundações. **Revista Formação**, Presidente Prudente, v. 25, n. 44, p. 279-299. 2018

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. Ciclo Hidrológico Planetário: abordagens e conceitos. ISSN 1981-9021 - **Geo UERJ** - Ano 12, v.1, nº 21, 2010.

MOURA, M. M.; CUNHA, Z. A.; TERRA, F. S.; MELLO, C. R.; CASSALHO, F.; BESKOW, S. Aplicabilidade de propostas geomorfológicas para o modelo de Nash na bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará-MG. In: **Encontro de Pós-Graduação da Universidade Federal de Pelotas**, Pelotas, RS. 2019.

NASH, J. E. The form of instantaneous units hydrograph. In: **Assemblee Generale de Toronto**, 3, 1957, Toronto. Anais... Toronto: IAHS, 1957, p.114-121

OLIVEIRA, A. N.; KOIDE, S.; COSTA, M. E. L.; BEZERRA, M. C. L. Padrões urbanos facilitadores a recarga dos aquíferos. **Revista Morfológica Urbana**, v. 7, n. 2, 10p. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU-Habitat: população mundial será 68% urbana até 2050. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-populacao-mundial-sera-68-urbana-ate-2050>. Acesso em: 14 out. 2022.

PÁDUA, L. H. R.; NAGHETTINI, M. Análise comparativa entre os modelos HUI-NASH, HUI NASH geomorfológico e HU-Mínimos quadrados. In: **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2017.

PÁDUA, L. H. R. **Regionalização de Hidrogramas Unitários em Bacias não monitoradas do estado de Minas Gerais**. Dissertação de mestrado (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. 174 p. 2015.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada** (Desenvolvimento de material didático ou instrucional) – Apostila de disciplina. 2004. 138p.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 301-307. 2001.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.

SAHOO, B., CHATTERJEE, C., RAGHUWANSHI, N. S. e SINGH, R. Estimativa de inundação por GIUH - Clark e Nash Models, **J. Engenharia Hidrológica**, 11, 515-525, 2006.

SANTOS, L. L. dos. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 03, p. 01-19, 48. 2009.

SCHUELER, T. Basic concepts of watershed planning. HOLLAND; H. (Ed.) **The practice of watershed protection**. Ellicott City, MD [U.S.A.]: Center of Watershed Protection, 2000. p.145-161.

SILVEIRA, A. L. L.; TUCCI, C. E. M. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS, 2000. 943 p.

SILVA, P. M. de O., MELLO, C. R. de, SILVA, A. M. da; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 12(3), 258-265. 2008.

TARGA, M. S. **Hidrologia e manejo de bacias hidrográficas**. Taubaté: UNITAU, 2008. 61f. 1 Apostila.

TERRA, T. A. **Análise do processo chuva-vazão utilizando o hidrograma unitário conceitual de Nash na bacia hidrográfica do Rio Santana**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas, 2021. 49 p.

TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 5-12, jul./dez. 1997.

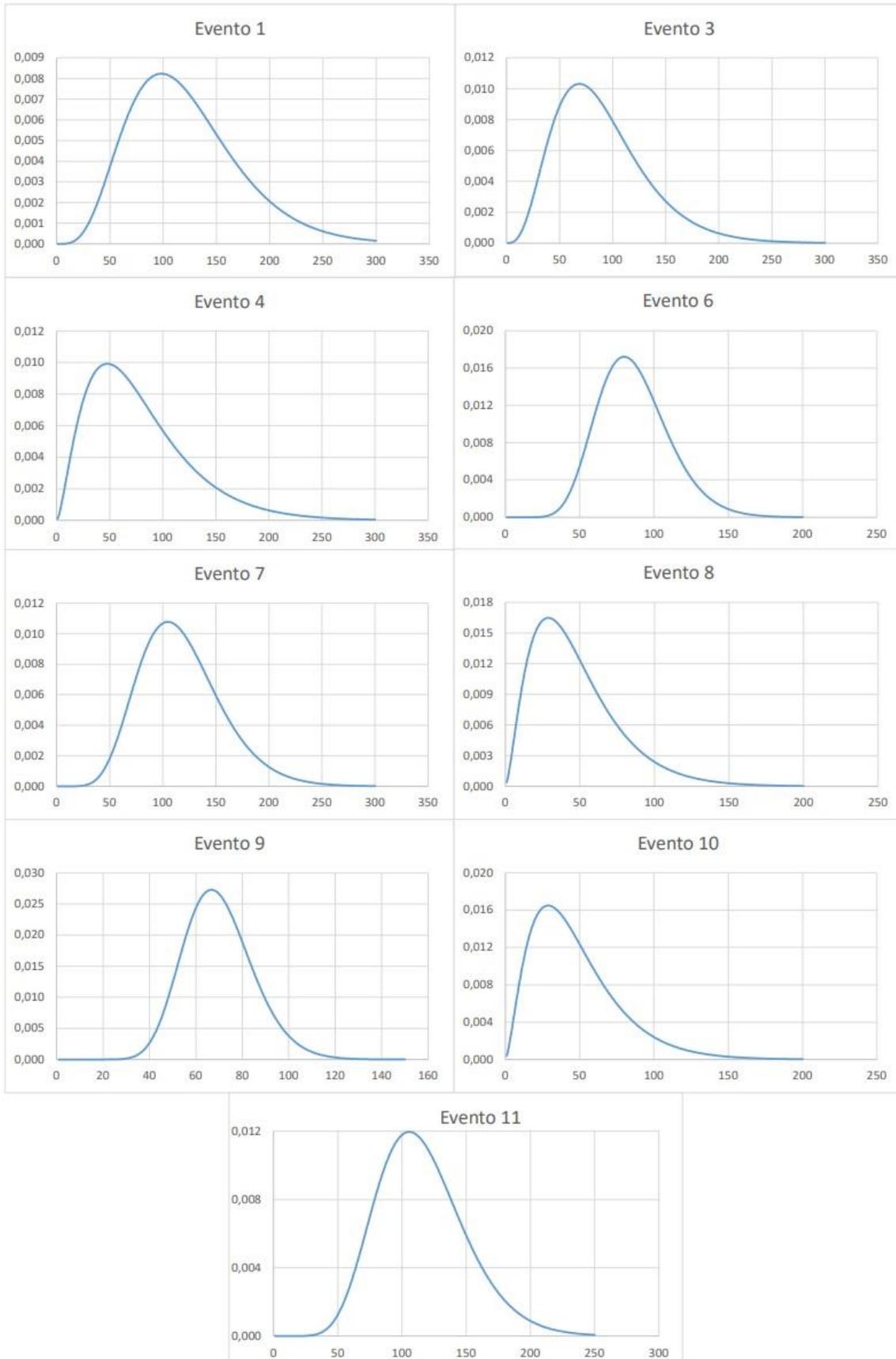
TUCCI, C.; CLARKE, R. Impactos das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v.2, n.1, p.135-152, 1997.

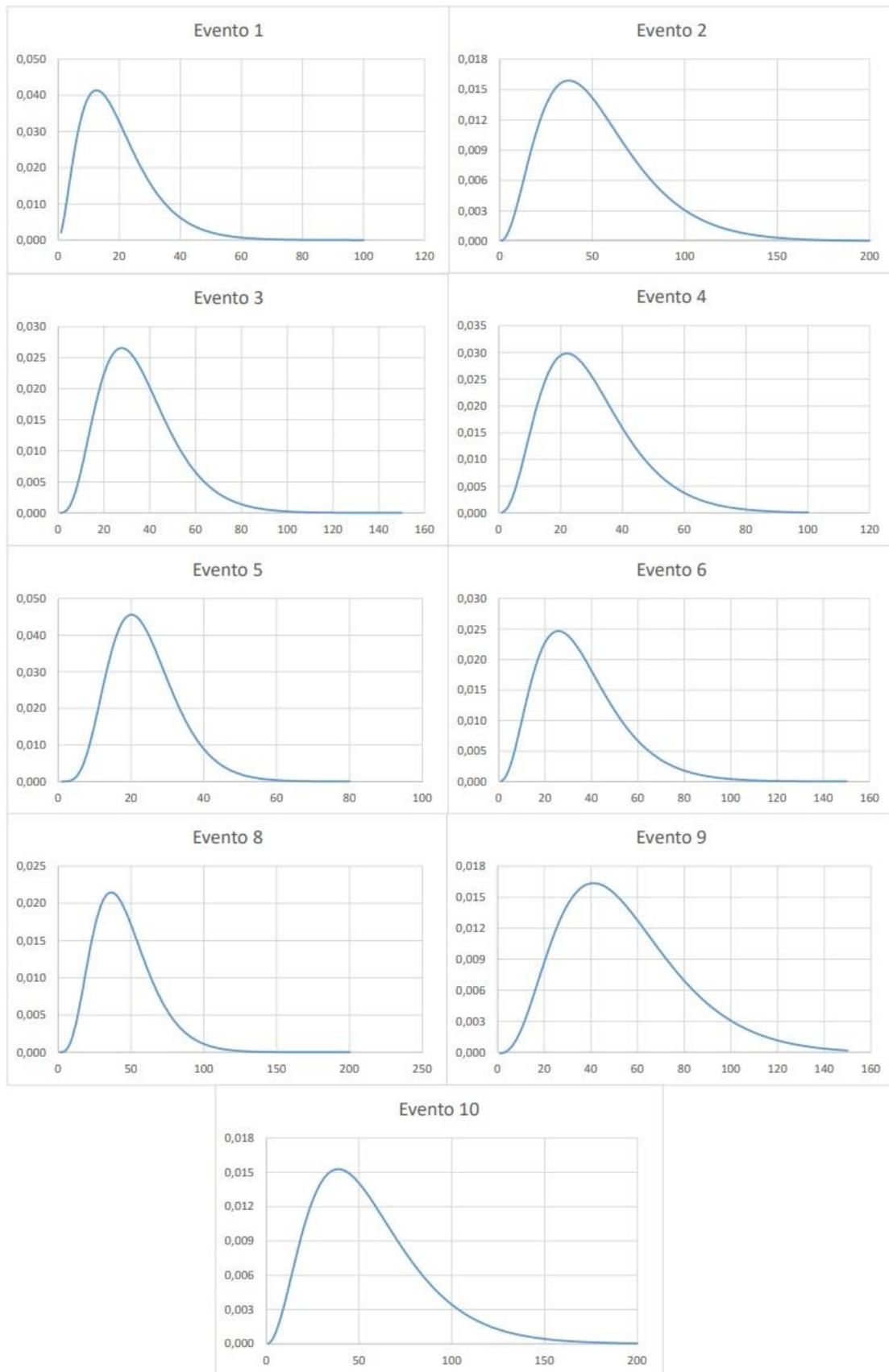
TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**, Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p. 1998.

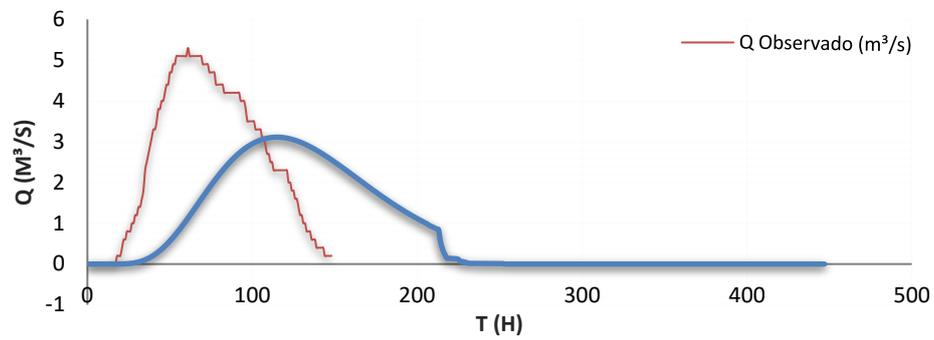
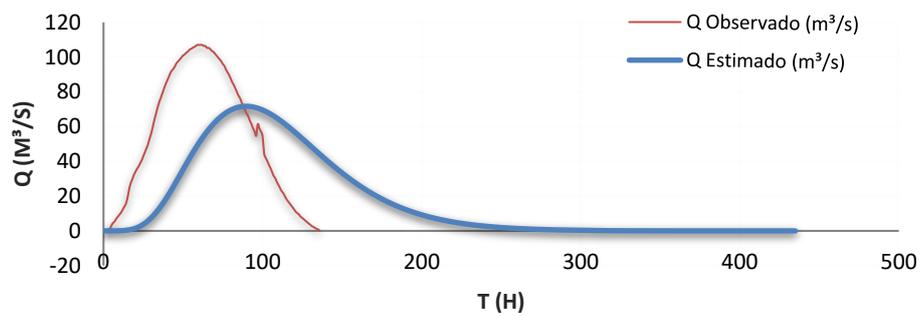
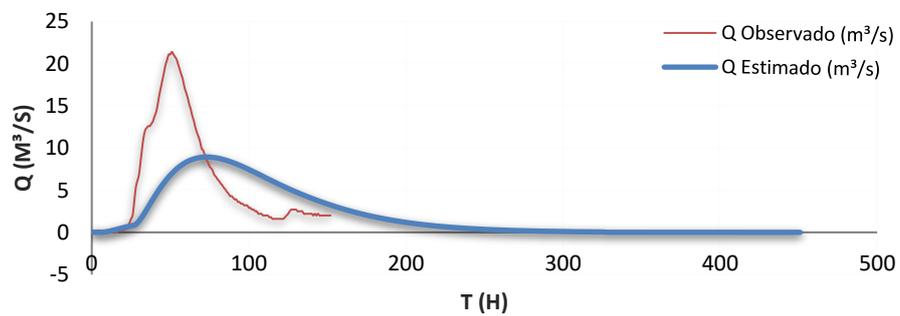
TUCCI, C. E. M (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2000. 943 p.

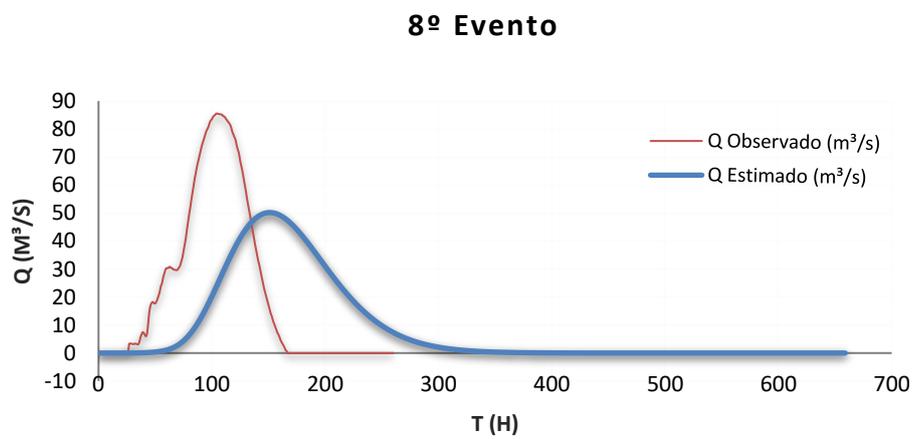
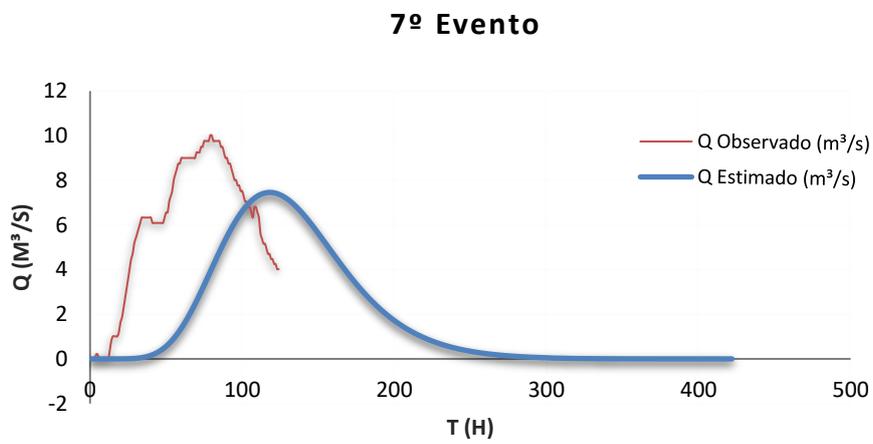
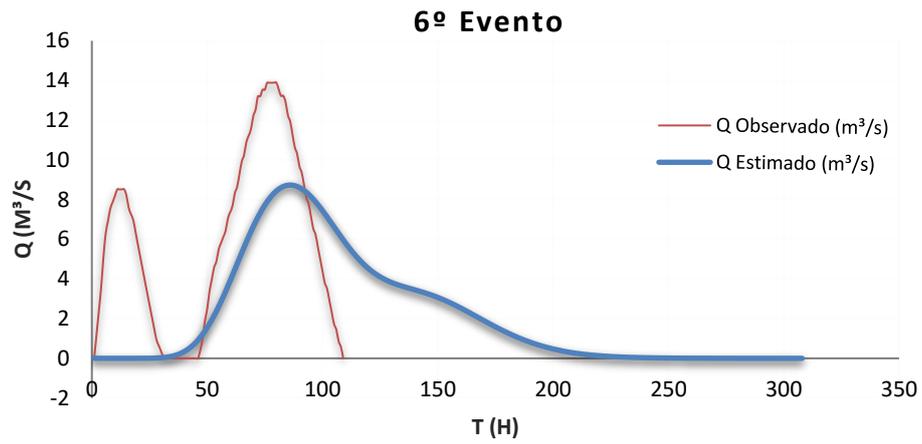
USDA - United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55. Washington: NRCS,1986. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/o-ciclo-da-gua-water-cycle-portuguese>. Acesso em: 10 jul. 2022.

YANG, J.; ZHANG, G. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. **Journal Of Soils And Sediments**, [s.l.], v. 11, n. 5, p.751-761. 2011.

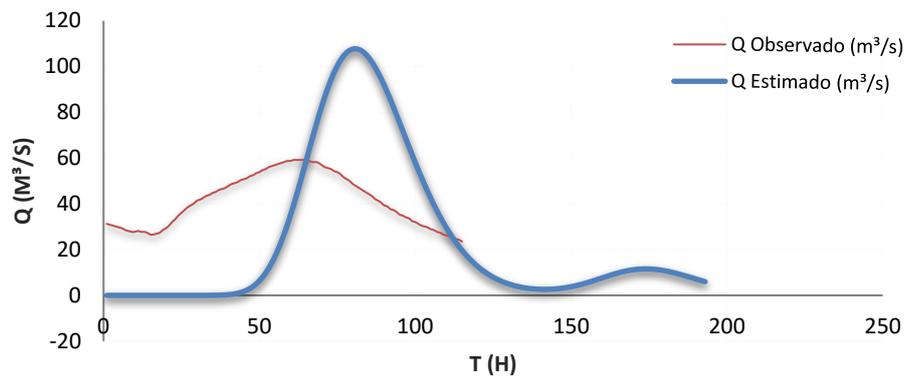
**APÊNDICE A – Hidrogramas unitários obtidos através da função gama - Itajubá**

**APÊNDICE B – Hidrogramas unitários obtidos através da função gama – PCH****Ninho da Águia Montante**

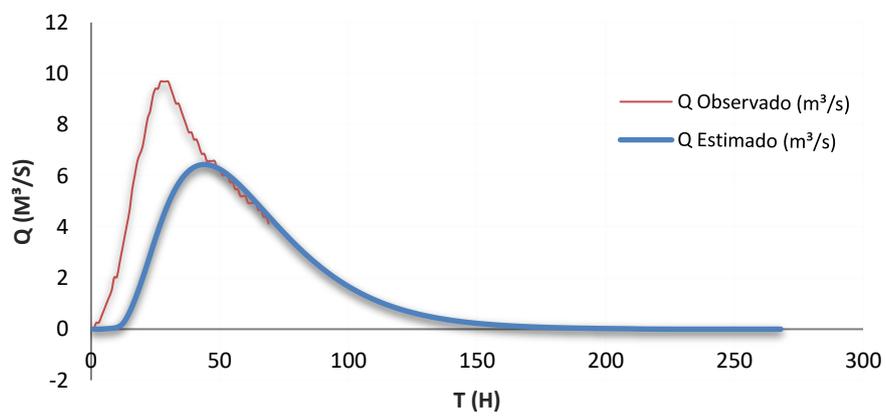
**APÊNDICE C – Gráficos da Convolução - Itajubá****1º Evento****3º Evento****Evento 4**



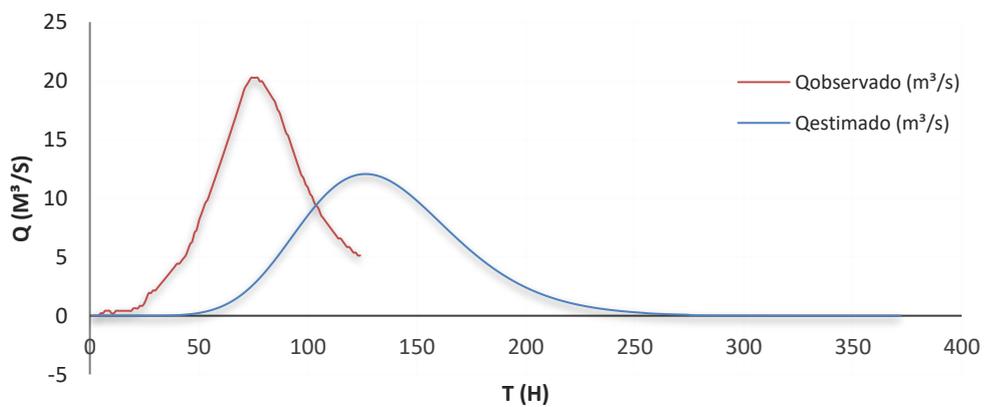
### 9º Evento

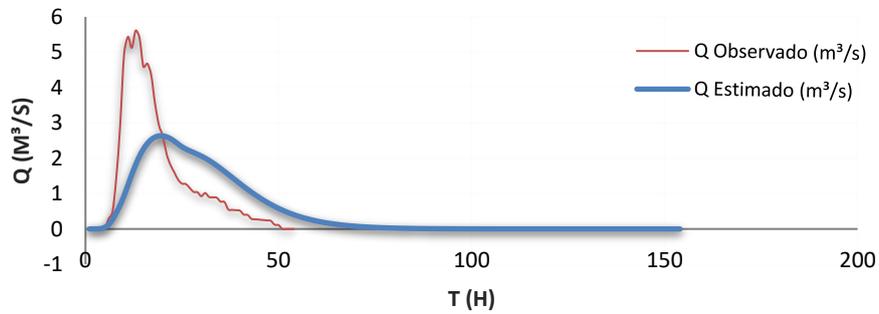
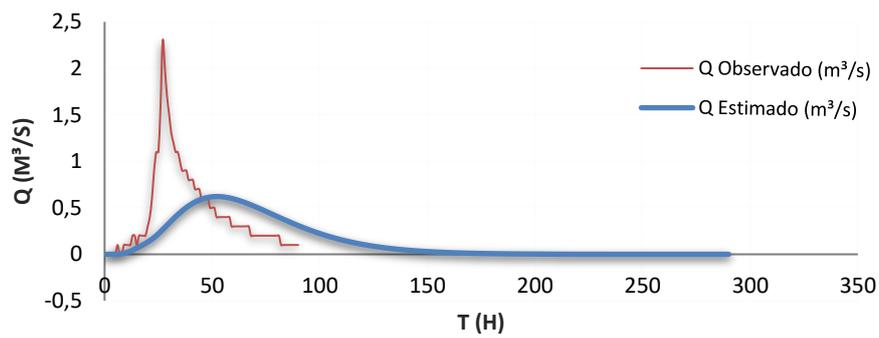
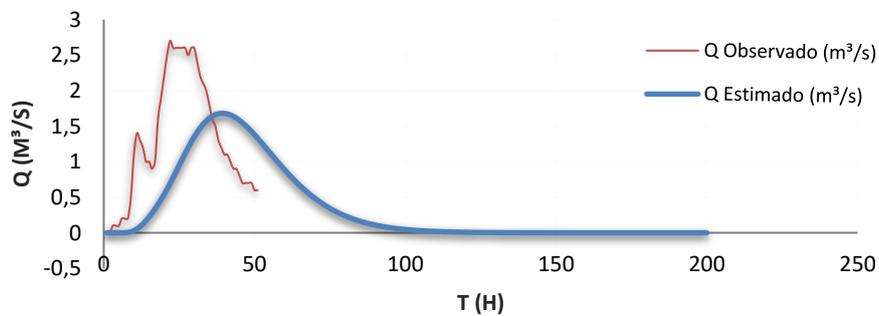


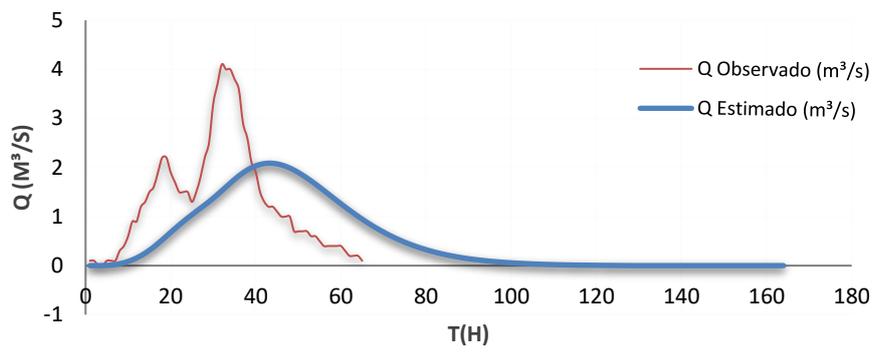
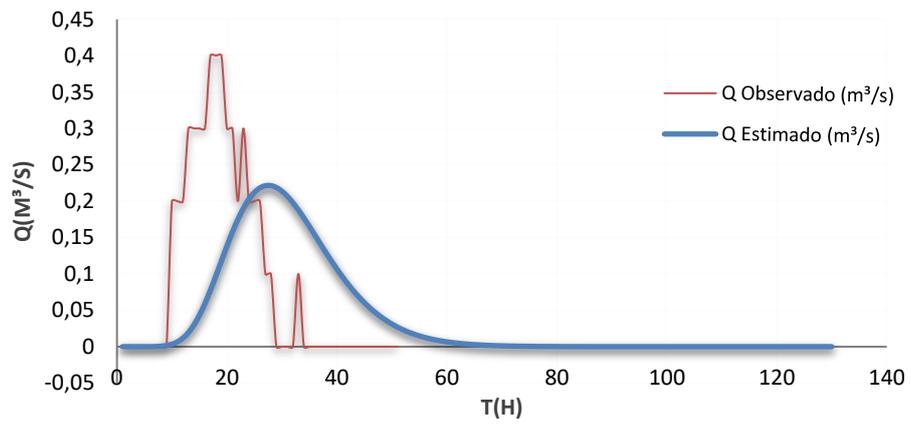
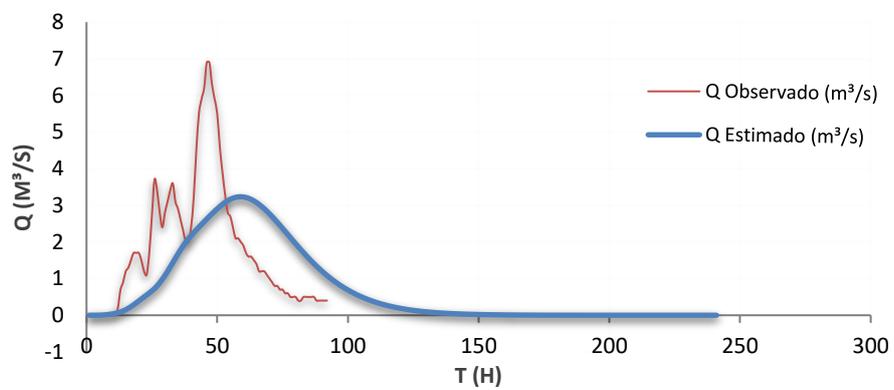
### 10º Evento

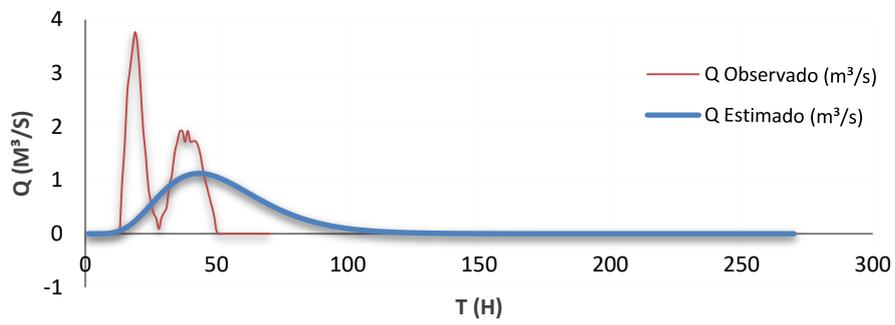
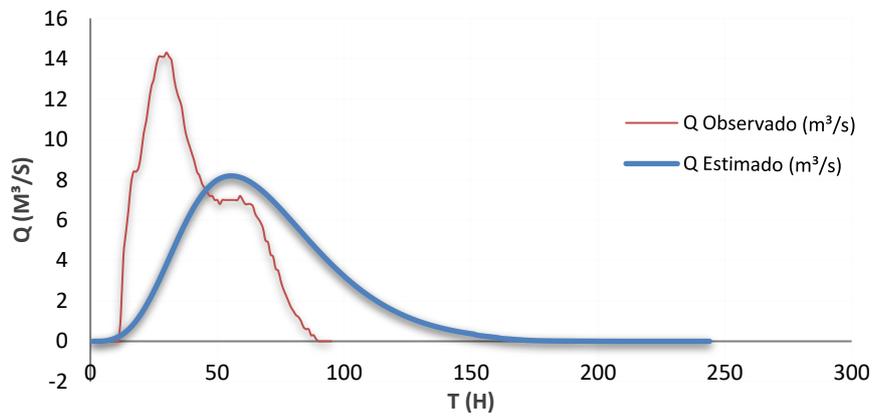


### 11º Evento



**APÊNDICE D – Gráficos da Convolução – PCH Ninho da Água Montante****1º Evento****2º Evento****3º Evento**

**4º Evento****5º Evento****6º Evento**

**8º Evento****9º Evento****10º Evento**