

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

THIAGO AUGUSTO TERRA

**ANÁLISE DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO
O HIDROGRAMA UNITÁRIO CONCEITUAL DE NASH NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTANA**

Poços de Caldas/MG

2021

THIAGO AUGUSTO TERRA

ANÁLISE DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO
O HIDROGRAMA UNITÁRIO CONCEITUAL DE NASH NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTANA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Aparecido Gonçalves

Poços de Caldas/MG

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca campus Poços de Caldas

Terra, Thiago Augusto.

T323a Análise do processo chuva-vazão utilizando o hidrograma unitário conceitual de Nash na bacia hidrográfica do Rio Santana / Thiago Augusto Terra. -- Poços de Caldas/MG, 2021.
49 f. --

Orientador(a): Flavio Aparecido Gonçalves.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2021.
Bibliografia.

1. Vazão de Rio. 2. Ciclo Hidrológico. 3. Hidrogramas. I.
Gonçalves, Flavio Aparecido. II. Título.

CDD – 628.1

Ficha Catalográfica elaborada por Thaís Aparecida de Lima
Bibliotecária-Documentalista CRB6/3032

**ANÁLISE DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO O HIDROGRAMA UNITÁRIO
CONCEITUAL DE NASH NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTANA**

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. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Aprovada em: 23 de fevereiro de 2021

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

Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas
Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Alexandre Silveira
Instituição:
Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por MURILO CESAR LUCAS, Usuário Externo, em 12/04/2021, às 16:57, 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 Flávio Aparecido Gonçalves, Professor do Magistério Superior, em 12/04/2021, às 16:58, 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 Alexandre Silveira, Professor do Magistério Superior, em 12/04/2021, às 17:00, 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, informando o código verificador 0495607 e o código CRC E763147B.

Dedico este trabalho aos três pilares de minha vida: meu filho, minha mãe e meu pai.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, principalmente aos colegas Bruno Araújo de Paula e Leonardo Santos Barbosa.

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Flavio Aparecido Gonçalves.

Agradeço a instituição Universidade Federal de Alfenas.

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

RESUMO

O processo de transformação da vazão é tópico vital e desafiador na área de Hidrologia. Por se tratar de um fenômeno complexo, a transformação da chuva em vazão pode ser feita usando modelos numéricos computacionais. Os modelos numéricos podem auxiliar no entendimento dos processos relevantes da chuva-vazão em bacias hidrográficas. No entanto, desses modelos geralmente envolve muitos de parâmetros, principalmente os modelos (semi-)distribuídos. A determinação dos parâmetros da modelagem chuva-vazão é custosa em termos de tempo e valor financeiro porque depende de dados medidos em campo, em laboratório e/ou por sensoriamento remoto. Por outro lado, há modelos matemáticos (não numéricos) que não dependem muitos parâmetros para a transformação chuva-vazão. Por exemplo, o modelo do hidrograma unitário de Nash (1957) considera a bacia hidrográfica como um sistema linear que é função de apenas dois parâmetros: número de reservatórios (n); e taxa de decaimento (k). Além disso, o valor desses dois parâmetros é obtido usando séries temporais de precipitação e vazão. O objetivo desse estudo é determinar um hidrograma unitário de Nash representativo para a bacia hidrográfica do Rio Santana, Estado do Rio Grande do Sul. Serão utilizados 42 eventos de precipitação para analisar a influência dos parâmetros sob a vazão de pico e o tempo de pico. Para a separação do escoamento subterrâneo foi utilizada a análise gráfica.; A determinação dos parâmetros n e k foi feita usando o método dos momentos e a convolução do vetor de escoamento superficial unitário. Os resultados de n e k foram iguais a 4,37 e 22,91, respectivamente. considerando a média dos 42 eventos de precipitação. Foi observada uma forte correlação ($r = -0,73$) entre os parâmetros n e k . A vazão de pico e o tempo de pico apresentaram forte correlação ($r = 0,63$) com k e o tempo de pico apresentou forte correlação ($r = 0,42$) com n . Portanto, o hidrograma unitário de Nash pode ser utilizado para transformação chuva-vazão na área de estudo, porque atingiu um nível de correlação satisfatório, com coeficiente de determinação igual a 0,797.

Palavras-chave: Deflúvio superficial. Modelagem hidrológica. Precipitação efetiva.

ABSTRACT

The process of modeling the flow from precipitation is one of the challenges that hydrology proposes to solve. Because they are complex systems, with several variables involved, the flow is often treated as a model response that is a function of a specific variable. Nash's model (1957) considers the basin as a linear system that is a function of two parameters: number of reservoir (n) and decay rate (k). Through the series of precipitation and flow data, it is possible to find, for each event, numerical values for these parameters that can be used to model future events. In this work, the objective was to find a representative average unit hydrograph for the Santana river basin, through 42 precipitation events, and to analyze the influence that the parameters have mainly on the peak flow and peak time. For the separation of the underground flow, graphic analysis was used; to determine the parameters n and k , the method of moments and convolution of unitary surface flow vector was used to model the hydrograph. Values of n equal to 4.37 and k equal to 22,91 were found for the mean of the 42 events. These events presented the best results for modeling, even when compared with the events selected according to the considerations of Phillip (2002). There was a strong correlation between parameters n and k with Pearson's coefficient equal to -0,73. It was also possible to observe a strong correlation between k and peak flow, with Pearson equal to 0,63 for the selected events and a Pearson of 0,42 indicating the correlation between n and peak time. It was concluded that the representative average unit hydrograph can be used for modeling future events for this basin, as it reaches a satisfactory level of accuracy, with R^2 equal to 0,797, despite finding that it underestimates the peak flow and overestimates the time of discharge peak.

Keywords: Surface runoff. Hydrological modeling. Effective precipitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relações dos componentes do ciclo hidrológico.....	5
Figura 2 - Critérios para classificação de modelos	7
Figura 3 - Exemplo de Hidrograma para um evento de precipitação.....	12
Figura 4 - Princípios do hidrograma unitário.....	13
Figura 5 - Principais modelos de hidrograma unitário.....	14
Figura 6 - Localização da BHRS.....	20
Figura 7 - Mapas de declividade e classes de solo da BHRS.	21
Figura 8 – Representação esquemática do modelo de Nash para “n” reservatórios.	22
Figura 9 – Exemplo de convolução em forma matricial com três pulsos de precipitação efetiva.....	24
Figura 10: Influência dos parâmetros ‘n’ e ‘k’ na função densidade e probabilidade.	24
Figura 11 - Fluxograma demonstrando as principais do trabalho.....	26
Figura 12 - Hidrogramas dos 42 eventos encontrados a partir do modelo de Nash..	27
Figura 13 - Hidrograma médio e sua convolução.....	28
Figura 14 - Correlação entre “n” e “k”	29
Figura 15 - Hidrogramas de cheia observados e modelados a partir do modelo conceitual de Nash.....	29
Figura 16 - Influência do parâmetro número de reservatórios na determinação do tempo de pico.....	31
Figura 17 - Influência do parâmetro taxa de decaimento (k) na determinação da vazão de pico (Q_p).....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Balanço de massa de água na Terra.....	3
Tabela 2 - Aplicabilidade de modelos hidrológicos.....	8
Tabela 3 - Valores dos parâmetros relacionados a cada evento de estudo.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	10
2 REVISÃO LITERATURA / DESENVOLVIMENTO	12
2.1 COMPONENTES DO CICLO HIDROLÓGICO E SUAS RELAÇÕES	12
2.2 PROCESSO CHUVA-VAZÃO.....	14
2.3 PRINCIPAIS MODELOS HIDROLÓGICOS	18
2.3.1 Método Racional	18
2.3.2 Método Curva-Número.....	19
2.4 HIDROGRAMAS UNITÁRIOS	20
2.5 APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS NO MUNDO.....	22
2.6 APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS NO BRASIL.....	23
3 ANÁLISE DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO O HIDROGRAMA UNITÁRIO CONCEITUAL DE NASH NA BACIA DO RIO SANTANA	25
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, cerca de 55% da população mundial reside em centros urbanos e as projeções indicam que, em 2050, aproximadamente 70% da população residirá nas cidades, conforme dados da Organização das Nações Unidas (ONU, 2019). A ocupação antrópica do meio ambiente sempre foi realizada de forma desorganizada, buscando o mínimo custo e o máximo benefício dos seres humanos. A expansão urbana causa a diminuição da infiltração de águas pluviais no solo e, conseqüentemente, o aumento significativo do escoamento superficial. Estudos tem mostrado o aumento significativo do volume e da vazão máxima de escoamento superficial em áreas urbanas e periurbanas (BRAUD *et al.*, 2013; MILLER *et al.*, 2014; PALLA; GNECCO, 2015).

Por causa do aumento do escoamento superficial, é esperado que as inundações sejam um dos principais desastres “naturais” responsáveis por perdas econômicas e de vidas humanas (CASERI *et al.*, 2016). As inundações urbanas causam, frequentemente, sérios prejuízos econômicos (danos às propriedades materiais), sociais (perda de vidas humanas, proliferação de doenças de veiculação hídrica) e a destruição da infraestrutura urbana (interrupção dos serviços públicos de energia elétrica e água e obstrução das vias de transporte).

Quantificando as variáveis hidrológicas, é possível entender melhor os fenômenos e descrevê-los de forma matemática. No começo do século XX, começaram os estudos em torno da frequência de cheias, dando início ao conceito de Hidrologia Estatística, que se desenvolveram com a quantificação de séries temporais para dimensionamento de reservatórios (TUCCI, 2001).

Com o passar do tempo e o avanço cultural e científico, a hidrologia deixou de ser uma ciência puramente descritiva e qualitativa. Os métodos quantitativos vêm sendo criados e aprimorados por meio de metodologias matemáticas e estatísticas e, juntamente com o avanço tecnológico, vem proporcionando instrumentos mais precisos e inovadores para mensuração e introdução de novas variáveis hidrológicas que retornam modelos melhor ajustados, ajudando a sociedade na previsão de eventos futuros potencialmente danosos. A modelagem hidrológica é utilizada como ferramenta para obtenção de conhecimento mais aprofundado a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e na previsão de cenários (MORAES, 2003).

Os modelos hidrológicos procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico. A sua construção se dá pela descrição de processos físicos utilizando

equações da conservação de massa e da equação da quantidade de movimento (SANTOS, 2009).

Uma das grandes dificuldades relacionadas a representação de uma bacia hidrográfica está na definição da escala de aplicação. Dados relacionados a bacias hidrográficas são geralmente coletados de forma pontual, e utilizados como representativos para toda a área. Por este motivo, inicialmente, o conhecimento foi fragmentado pela análise de cada um dos processos, como a avaliação da precipitação, interceptação vegetal, evapotranspiração, infiltração e percolação, balanço de água nas camadas superior e inferior do solo e os escoamentos superficial, subsuperficial, subterrâneo e em rios, canais e lagos. Todos esses processos são representados através de métodos matemáticos (TUCCI, 2010).

Uma das representações matemáticas de maior utilização para modelagem do processo chuva-vazão é o hidrograma unitário. A determinação do hidrograma unitário depende de dados observados de precipitação e vazão compatíveis com o tempo de concentração da bacia. Séries históricas de precipitação são mais comuns quando comparadas com a disponibilidade de dados de vazão, principalmente em áreas urbanas. Mesmo que não houvesse carência de dados, as bacias hidrográficas sofrem frequentes alterações do solo, tornando as séries de dados não – estacionárias (TUCCI, 2003).

Nash (1957) propõe uma modelagem do processo chuva-vazão baseado em dados de séries históricas de precipitação e vazão. Conceitualmente, este modelo considera a bacia hidrográfica como um sistema linear que produz uma resposta perante um estímulo de precipitação efetiva, e retorna dois parâmetros: i) número de reservatórios “n”; ii) taxa de decaimento “k”; que precisam ser calibrados para cada bacia hidrográfica, com base nos eventos selecionados.

Neste sentido, este trabalho se justifica na busca por melhor entendimento da modelagem chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio Santana, Estado do Rio Grande do Sul, que apresenta uma área de drenagem de médio porte, aproximadamente 790 km², e tem por objetivo a análise da modelagem do escoamento superficial pelo método do hidrograma unitário proposto por Nash, que fundamentalmente se propõe a caracterizar eventos intensos que, geralmente, ocasionam em inundações.

2 REVISÃO LITERATURA / DESENVOLVIMENTO

2.1 COMPONENTES DO CICLO HIDROLÓGICO E SUAS RELAÇÕES

Silveira e Tucci (2000) utilizam a seguinte definição: “Ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre.”. Os autores também afirmam que o ciclo hidrológico só é fechado em escala global, sendo que o seu balanço quantitativo se resume na Tabela 1.

Tabela 1 - Balança de massa de água na Terra

Local	Quantidade x 10 ¹⁵
	m ³
Oceanos	1350
Geleiras	25
Águas Subterrâneas	8,4
Rios e Lagos	0,2
Biosfera	0,0006
Atmosfera	0,0130

Fonte: Tucci (2000, p. 39).

Admitindo-se o ciclo fechado, é possível descrevê-lo, de forma básica, a partir do vapor presente na atmosfera. Ao se condensar, formam-se gotículas de água que ficam suspensas até que as condições meteorológicas favoreçam que essas massas sejam deslocadas horizontalmente e verticalmente até encontrar a superfície, descrevendo a principal forma de transferência de água para a superfície terrestre, que é a precipitação. No trajeto, em direção a superfície, a precipitação pode ocorrer em forma de chuva, granizo ou até mesmo geada, sendo que neste mesmo processo, a água pode evaporar, voltando a atmosfera (SILVEIRA, TUCCI, 2001).

Ao cair sobre a superfície terrestre, a água pode ficar interceptada em alguma cobertura da superfície, seja ela vegetal ou qualquer outra, de onde sofre o fenômeno de evapotranspiração, que segundo Righetto, (1998), corresponde a aproximadamente de 50 a 60% do ciclo hidrológico. Por ação de agentes naturais, tal como o vento, a água é direcionada ao solo. Ao encontrar o solo, a água tem diversos destinos. Primeiramente, ela pode se infiltrar e percolar no solo devido a porosidade deste meio, favorecendo a recarga subterrânea (MELLO, 2003). Entretanto, a taxa com que a água se infiltra no solo se torna praticamente residual,

pois o solo vai se saturando, e assim começa o escoamento superficial.

Pruski *et al* (2001) salienta que a vazão em um rio pode apresentar duas componentes: o superficial direto, e o escoamento de base. O primeiro tem suas origens pela alta intensidade de precipitação, que possui volume maior do que a capacidade de infiltração do solo. Já o segundo é parte fundamental da manutenção e produção de água na bacia hidrográfica. Mello (2003) ressalta que o escoamento de base é um importante indicador ambiental, sendo que quando este atinge volumes mais baixos, pode-se concluir que a bacia hidrográfica não está tendo o manejo adequado, e processos como desmatamentos, compactação do solo, remoção e queima da palhada podem estar ocorrendo, o que diminui a recarga dos aquíferos e nascentes, e, dependendo da intensidade com que este fenômeno ocorre, os danos podem ser irreversíveis, transformando cursos d'água perenes em efêmeros.

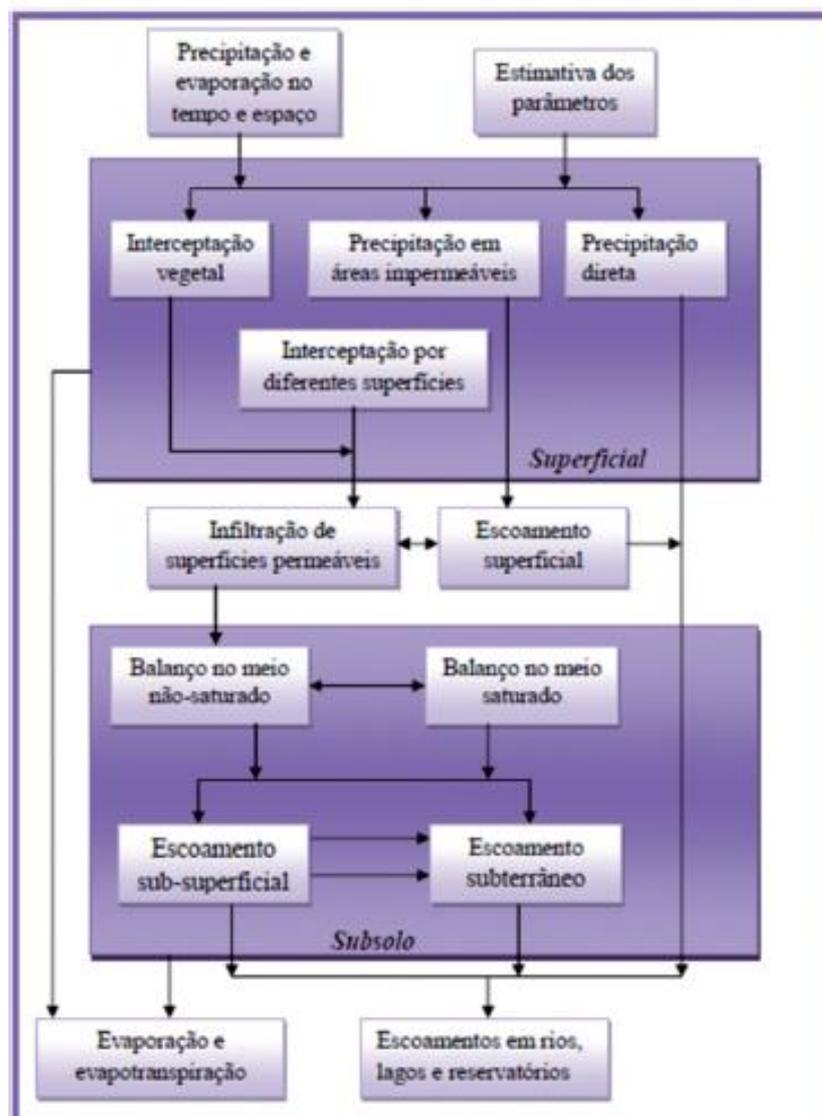
Nos oceanos, por interferência de diversos fatores físicos e meteorológicos, como rotação terrestre, ventos da superfície, correntes marítimas e marés, a água circula e fica armazenada. Por meio da radiação solar, a água evapora de volta para a atmosfera até o ciclo se iniciar novamente. Importante ressaltar que em qualquer variação geográfica e temporal, a água sofre o fenômeno da evaporação (SILVEIRA, TUCCI, 2001; MELLO 2003). Na Figura 1 é possível observar as relações existentes entre todos os componentes do ciclo hidrológico.

A área física na qual são promovidos todos os eventos e componentes do ciclo hidrológico é chamado de bacia hidrográfica. Silveira e Tucci (2001) definem a bacia hidrográfica como: “um conjunto de superfícies vertentes, com uma rede de drenagem que é formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exultório”. Mello (2003) afirma que não há na literatura uma definição de bacia hidrográfica quanto à dimensão de área.

A bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema de entrada e saída de água, sendo a principal entrada pelo processo de precipitação e a saída sendo um conjunto de componentes dados pelo: i) escoamento no exultório; ii) as perdas intermediárias; iii) os volumes evapotranspirados e infiltrados. Em um evento de precipitação, a água cai por essas vertentes, infiltra até sua saturação e escoar para a rede de drenagem, portanto, fatores físicos da bacia hidrográfica influenciam diretamente nas respostas a estes eventos. Righetto (1998) considera que as unidades pedológicas, cobertura vegetal, características geomorfológicas

(declividade e formato das vertentes e do curso de água; área e rede de drenagem), características geológicas são fatores que influenciam no processo chuva-vazão.

Figura 1 - Relações dos componentes do ciclo hidrológico



Fonte: Tucci (2005, p. 238).

2.2 PROCESSO CHUVA-VAZÃO

Em toda sua existência, a hidrologia se baseava em elementos descritivos do funcionamento dos fenômenos naturais e todo seu equacionamento estava fundamentado empiricamente. A partir da década de 1930, trabalhos quantitativos começavam a revolucionar o que antes era subjetivo. Sherman em 1932, Horton em 1933 e Theis em 1935 são três autores que se destacaram nesta década com estudos de grande contribuição científica. O primeiro apresentou o conceito de hidrograma unitário para estimativa do escoamento superficial; o segundo,

apresentou um equacionamento para cálculo da infiltração e o terceiro, desenvolveu a teoria para hidráulica de poços em regime transiente (TUCCI, 2001).

Marinho Filho (2012) ressalta que existem registros de projetos de redes de esgoto na literatura nos últimos anos do século XIX, utilizando-se do Método Racional proposto por Mulvany por volta de 1850. Clarke (1973) cita os trabalhos de Mero, que apresentou os primeiros modelos semi-conceituais que adotavam a abordagem chuva-vazão aplicados no rio Columbia.

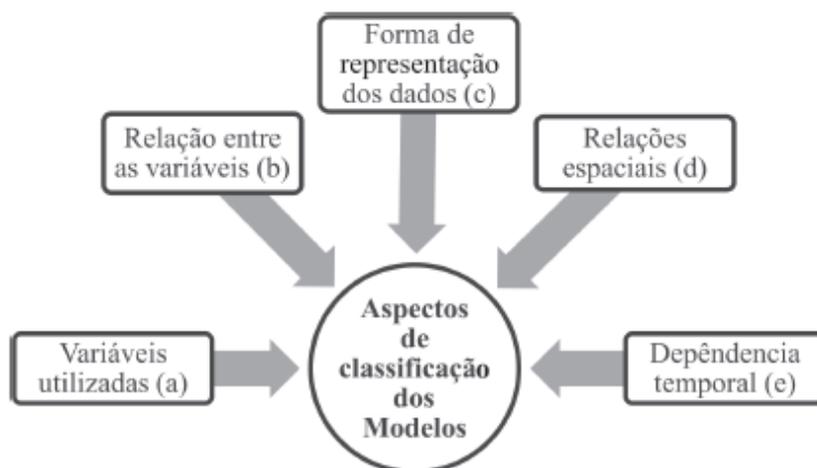
Tucci (1987) ressalta que a modelagem é a representação, por meio de equacionamento matemático de um fenômeno físico, esquema ou procedimento, seja ele real ou abstrato, onde se introduz uma informação de entrada, podendo ser um estímulo ou informação, analisada em um certo intervalo de tempo, e essa entrada provoca uma resposta, uma saída ou efeito de energia ou informação.

Dessa forma, não existe um modelo único, tido como ideal para representação de um fenômeno específico. O mesmo sistema, na mesma área, pode ser representado por dois (ou mais) modelos, que se diferenciam na escala de análise, por exemplo, ou até mesmo se objetivo de um modelo for uma análise pontual (discreta) e o outro for uma análise contínua no tempo. Christofolletti (1999) considera que um modelo é resultado da criatividade e do conhecimento que seu autor possui sobre o fenômeno. Por este motivo, um único fenômeno pode ser modelado de várias maneiras diferentes.

A década de 1950 foi um marco na evolução da modelagem hidrológica com o avanço da tecnologia com o aumento da disponibilidade de computadores. Modelos com embasamento físico foram desenvolvidos e altamente explorados pelas condições de processamento que os computadores ofereciam (TUCCI, 1998).

Moreira (2005) propõe um sistema de classificação dos modelos (Figura 2) baseado em cinco critérios, sendo eles: 1) Tipo de variáveis escolhidas (estocástico ou determinístico); 2) o tipo de relações entre as variáveis (empírico ou conceitual); 3) a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); 4) existência (ou não) de relações espaciais (concentrados ou distribuídos); e 5) a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Figura 2 - Critérios para classificação de modelos



Fonte: Marinho Filho (2012, p. 07)

Modelos determinísticos apresentam uma única resposta para cada dado de entrada, diferentemente do modelo estocástico que possui pelo menos uma variável aleatória que é dada em função de distribuição de probabilidade.

Modelos empíricos, também conhecidos como modelos “caixa-preta” são aqueles que a resposta está em função de análises estatísticas. Por outro lado, os conceituais são os que se baseiam nos fundamentos físicos para representar o fenômeno estudado.

Os modelos concentrados são aqueles que a resposta não está influenciada pela distribuição espacial, sendo que a resposta está relacionada principalmente com o tempo. Eles consideram valores médios para as variáveis, sendo estes valores representativos por toda extensão da bacia hidrográfica. Já os distribuídos são aqueles que consideram a variabilidade espacial. De acordo com Cunha (2004), estes modelos aplicam a lei de conservação de massa em escala local e fazem uso de uma grande quantidade de dados.

A diferença entre os modelos estacionário e dinâmico é a variação no tempo. O primeiro, analisa um momento isolado, suas variáveis não alteram com o tempo. Já o segundo, são funções variáveis em função do tempo.

Os modelos discretos, são aqueles que buscam representar períodos isolados da série de dados, como por exemplo, eventos de cheia. Os contínuos representam longos períodos de série de dados, compreendendo diversos comportamentos do ciclo hidrológico. Entretanto, os modelos contínuos precisam ser discretizados no tempo, é o passo de cálculo ou intervalo de tempo (dt). Portanto, quanto menor o

intervalo de tempo, mais preciso é o resultado da modelagem (MARINHO FILHO *et al*, 2012).

O universo da modelagem hidrológica é bem variado, servindo de instrumentos de gestão pública, como no caso de controle do uso de água e abastecimento, até serviços de transporte, como dimensionamento de canais para navegação. Na Tabela 2 está apresentada uma diversidade de aplicações de modelos hidrológicos em questões ambientais.

Tabela 2 - Aplicabilidade de modelos hidrológicos

(continua)

Área	Foco	Principais Modelos
Desenvolvimento urbano	<i>Abastecimento de água:</i> regularização, adução, tratamento e distribuição.	Precipitação-vazão; balanço de reservatório; modelo Hidráulico da rede de condutos.
	<i>Tratamento de esgoto:</i> rede de coleta, tratamento, despejo do afluente, impacto ambiental do afluente em rios, lagos, reservatórios e oceanos.	Hidráulica da rede coletora; qualidade da água de rios, reservatórios, lagos e estuários.
	<i>Drenagem urbana e controle de cheias:</i> redes pluviais, obras hidráulicas e previsão de enchentes.	Precipitação-vazão para dimensionamento e previsão de cheias; amortecimento em reservatório; remanso de rios e canais; qualidade da água de redes pluviais.
Energia	<i>Projeto e operação de hidrelétricas:</i> disponibilidade hídrica, regularização para energia firme, projeto de vertedores, diques, condutos, previsão de afluência de vazões e operação hidráulica dos reservatórios em tempo real	Precipitação-vazão para extensão de série temporal e previsão em tempo real para operação do sistema; balanço de reservatórios; hidráulico de rios e canais; modelo de dispositivos hidráulicos.
Transporte	<i>Navegação:</i> canal de navegação; barragem e eclusa; manutenção dos sistemas; níveis e calados; portos.	Precipitação-vazão para estimar a vazão; modelos de rios para estimativa do calado e de operação de barragem.
Controle de calamidades	<i>Rompimento de barragens:</i> eventos críticos. <i>Cheias:</i> alerta da população ribeirinha. <i>Estiagens:</i> racionamento para abastecimento urbano e irrigação.	Modelos hidráulicos de rompimentos de barragens; modelos precipitação-vazão e vazão-vazão em tempo real para estiagens e cheias.

Tabela 2 - Aplicabilidade de modelos hidrológicos

(conclusão)

Área	Foco	Principais Modelos
Gerenciamento de recursos hídricos	<i>Concessão do uso da água. Controle do uso e conservação da água.</i>	Modelos precipitação-vazão; regionalização de variáveis hidrológicas; modelos de balanço e escoamento em rios.
Sistema de informações	<i>Cadastro de usuários. Monitoramento de variáveis hidrológicas.</i>	Modelos hidrológicos para preenchimento de falhas; precipitação-vazão; estatísticos.
Produção agrícola	<i>Irrigação: disponibilidade hídrica, regularização, necessidade hídrica agrícola e distribuição Impacto de obras hidráulicas: reservatórios, diques e polders. Impacto devido a despejo de</i>	Precipitação-vazão; balanço de reservatório; balanço agrícola; projeto e otimização de rede de canais. Modelos hidráulicos e de qualidade da água de rios, reservatórios e de cargas difusas; hidráulicos e de qualidade de água de lagos e estuários; precipitação-vazão, erosão e transporte hídrico.
Controle ambiental	<i>afluentes: efluentes industriais e domésticos. Impacto devido a uso do solo rural e urbano: erosão do solo, impermeabilidade e rede de condutos.</i>	

Fonte: Marinho Filho (2012, p.11).

2.3 PRINCIPAIS MODELOS HIDROLÓGICOS

2.3.1 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).

Tucci (2000) considera que um dos fatores que mais afeta o escoamento superficial é a urbanização de uma área. Garotti e Barbosa (2010) 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: i) a duração da precipitação intensa deve ser igual ao tempo de concentração; ii) a chuva é uniformemente distribuída, tanto no tempo quanto no espaço da área da bacia hidrográfica; iii) o valor do coeficiente C deve ser constante durante toda a chuva.

Perante as premissas que devem ser consideradas, nota-se que o método tem limitações. Uma delas é que para a chuva ter intensidade uniforme no espaço e no tempo, a área da bacia hidrográfica não pode ser muito grande, usualmente até 2 km², sendo que originalmente, o método foi desenvolvido para bacias rurais de até 0,5 km²; e também não avalia o volume da cheia e a distribuição temporal das vazões (GAROTTI, BARBOSA, 2010).

2.3.2 Método Curva-Número

O método Curva Número (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. Este método é utilizado para se estimar o volume de escoamento superficial em pequenas bacias hidrográficas, as quais sejam disponíveis informações relativas as condições do solo e da vegetação, além das precipitações antecedentes (PRUSKI, 2001).

Duràn-Barroso, Gonzáles e Valdés (2016) dizem que é o método com maior aplicabilidade por conta do reduzido número de parâmetros que são necessários, além da facilidade matemática de utilização. Este método é apresentado na literatura como método do número da curva, exigindo o conhecimento prévio da precipitação e do complexo hidrológico solo-vegetação (ROJAS, 1984).

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). Para a modelagem de previsão de cheias, alguns fatores hidrológicos prévios ao evento são importantes, o que influencia na resposta da bacia hidrográfica ao estímulo da precipitação. O Método CN - SCS faz uso de uma adoção 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).

2.4 HIDROGRAMAS UNITÁRIOS

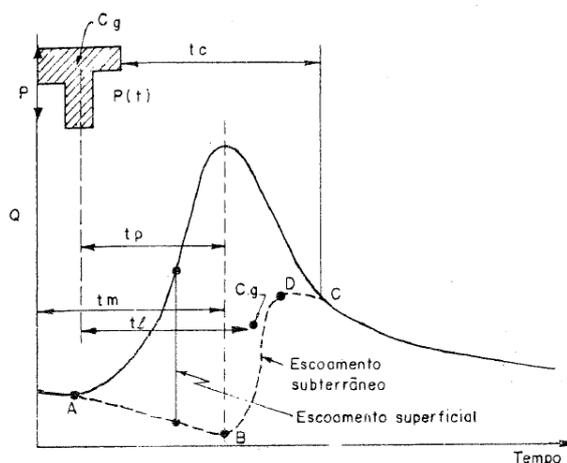
O hidrograma é a forma gráfica de representar o escoamento superficial, ou deflúvio superficial, em função do tempo em uma seção de controle. Righetto (1998), afirma que o hidrograma deve ser interpretado como a resposta da bacia hidrográfica quando ocorre o evento de chuva. Segundo Tucci (2001), a distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico entre a ocorrência da precipitação e a vazão no exultório. Na Figura 3 está apresentado um hidrograma após um evento de precipitação.

Após ocorrida a precipitação, há um intervalo de tempo em que a curva do escoamento superficial a se elevar, este intervalo pode ser caracterizado pelos fenômenos de interceptação e perdas iniciais. Após estas perdas, a vazão aumenta gradativamente (t_m) até chegar em seu valor máximo, a vazão de pico, que ocorre em seu tempo de pico (t_p). Após o pico, a curva do escoamento superficial começa a entrar em recessão a se observa uma aproximação entre as curvas de escoamento. A diferença de velocidade entre os dois tipos de escoamento se dá devido ao meio em que eles se manifestam. O superficial responde rapidamente ao estímulo de precipitação efetiva por se manifestar no corpo hídrico superficial (e.g., rios), já o subterrâneo se manifesta no meio poroso (e.g., aquíferos granulares com porosidade primária), portanto o seu gradiente de velocidade é menor. O escoamento subterrâneo se iguala ao escoamento superficial até que vai regredindo até chegar ao ponto em que o sistema não apresenta mais resposta ao estímulo de precipitação. O tempo entre o fim da precipitação até o ponto de inflexão do hidrograma é chamado de tempo de concentração (t_c) e o tempo de retardo (t_r) é o intervalo entre o centro de massa da precipitação até o centro de gravidade do hidrograma (Tucci, 2001).

O hidrograma, e suas derivações, como o hidrograma unitário (HU), é a representação gráfica mais usada para a descrição de das vazões. Aguirre *et al.* (2005) salienta que o hidrograma unitário é um modelo introduzido por Sherman (1932) e admite que a bacia hidrográfica é um sistema formado por reservatórios lineares em que, perante um estímulo de precipitação efetiva, produz uma resposta que se propaga por sua função de transferência (o hidrograma unitário).

Segundo Villela (2001), o hidrograma unitário é o hidrograma de cheia produzido por uma chuva efetiva unitária (igual a 1 cm ou 1 mm) e uniforme com duração específica, portanto, o volume do hidrograma unitário é igual ao volume da precipitação efetiva que caiu uniformemente sobre a bacia hidrográfica.

Figura 3 - Exemplo de Hidrograma para um evento de precipitação



Fonte: Tucci (2001)

Algumas premissas devem ser adotadas ao considerar o hidrograma um sistema linear e invariante no tempo: a) constância do tempo de base; b) proporcionalidade; c) aditividade ou superposição (INNOCENTE, 2016).

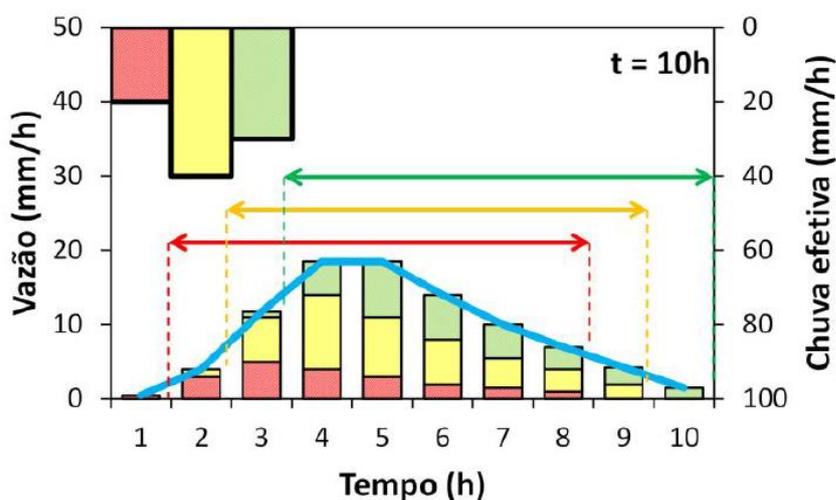
O tempo de base é o tempo de resposta da bacia hidrográfica e ele deve se manter constante a qualquer estímulo de precipitação efetiva de uma unidade de tempo. A resposta da bacia hidrográfica (escoamento) é proporcional ao volume de precipitação efetiva e essas respostas podem se somar (aditividade) se houver mais de um impulso de precipitação. Na Figura 4 estão ilustrados os princípios do hidrograma unitário. Nota-se que o tempo de resposta bacia hidrográfica perante cada impulso de precipitação é o mesmo. O volume precipitado e o escoado é igual e a soma das respostas individuais distribuídas no tempo de base representam o hidrograma final.

Tucci (2003) elenca as limitações do HU para a estimativa do escoamento superficial como sendo: (a) representação linear do escoamento superficial que tem um comportamento não-linear; (b) distribuição uniforme da precipitação dentro do intervalo de tempo; (c) distribuição espacial uniforme da precipitação; e (d) erros nos métodos de separação do escoamento superficial e subterrâneo geram valores hidrológicos para a determinação do HU.

Algumas considerações devem ser tomadas ao aplicar o hidrograma unitário,

pois cada evento de precipitação (de mesma duração) irá ocasionar um hidrograma unitário proporcional ao respectivo evento de precipitação. Logo, um hidrograma unitário resultante para cada bacia hidrográfica será estimado.

Figura 4 - Princípios do hidrograma unitário



Fonte: Innocente (2016, p.34).

Deve-se adequar os dados que irão formar o hidrograma unitário de acordo com o objetivo do mesmo. Para eventos de inundação frequente (período de retorno menor que 2 anos), devem ser utilizados eventos de pequena e média magnitude. Já para eventos considerados raros, devem ser utilizados dados de um ou dois eventos dentre os maiores eventos registrados na série histórica, pois ao se utilizar dados de pequenos para este tipo de modelagem, a resposta acaba sendo subestimada. Eventos pequenos possuem velocidade de escoamento menor dentro da calha menor do rio, portanto, necessitam de um tempo maior para escoar. Por outro lado, eventos maiores apresentam maiores velocidades e menores tempo de resposta. Este fato caracteriza o efeito não-linear da bacia hidrográfica (TUCCI, 2003).

2.5 APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS NO MUNDO

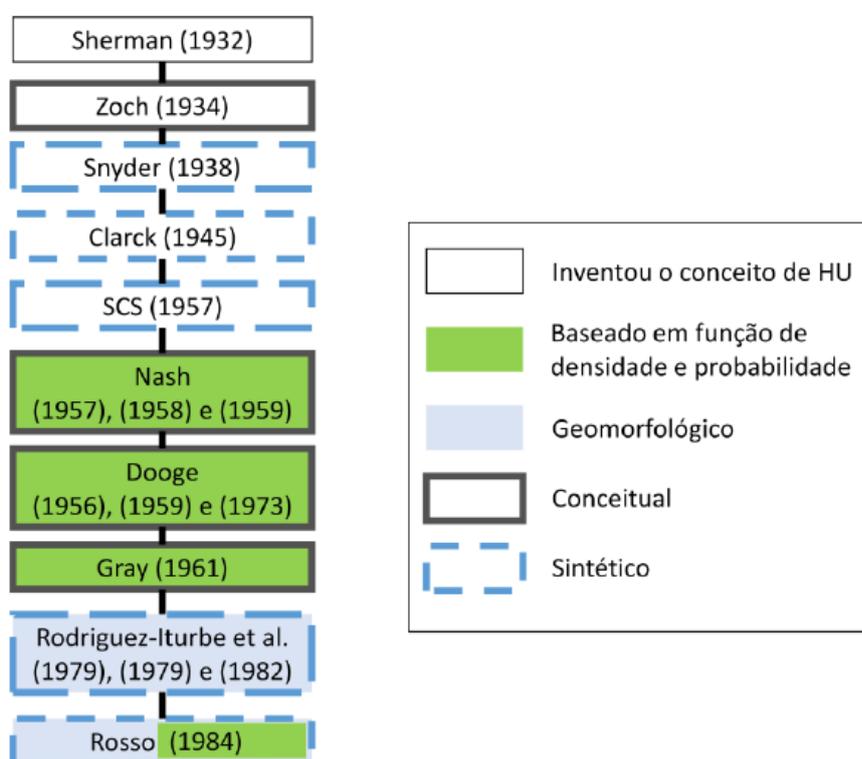
Bhunya *et al* (2011) classificou os hidrogramas unitários em três classes: i) sintéticos; ii) conceitual; iii) geomorfológico. Innocente (2016), utilizando-se desta classificação elaborou o esquema da Figura 5 apresentando a evolução histórica dos hidrogramas unitários, juntamente com seus autores.

Zoch (1934) propôs que o comportamento da bacia hidrográfica era igual ao de um reservatório com o escoamento superficial decaindo exponencialmente.

Snyder (1938) propôs um modelo sintético sob a premissa de que o escoamento é totalmente dependente das características físicas da bacia hidrográfica. Clark (1945) propôs um modelo baseado na curva-tempo-área, que divide a bacia hidrográfica em frações quanto a sua área e cada fração é responsável pelo escoamento superficial num dado intervalo de tempo.

Dooge (1956) e Gray (1961) fundamentaram seus modelos sob as premissas do modelo de Nash (1957) que trata a bacia hidrográfica como um sistema linear com “n” reservatórios em sequência e a transferência do escoamento se dá por uma taxa “k”. O modelo responde como uma função densidade e probabilidade com ambos os parâmetros sendo calibrados por séries de dados.

Figura 5 - Principais modelos de hidrograma unitário



Fonte: Innocente (2016, p.35).

Rodriguez-Iturbe *et al* (1979) propõe um modelo baseado na premissa de que uma partícula de água percorre um caminho pré-estabelecido dentro da bacia hidrográfica, sendo que o hidrograma unitário está associado a geomorfologia da bacia hidrográfica e ao rio de maior ordem. Já Rosso (1984) propõe um modelo que mistura as teorias de Nash (1957) e de Rodriguez-Iturbe *et al* (1979).

2.6 APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS NO BRASIL

Tucci (2003) publicou uma regionalização de alguns parâmetros do

hidrograma unitário triangular proposto pela SCS (1972) e apresentou algumas equações para determinação do tempo de concentração e vazão de pico de bacias hidrográficas urbanas brasileiras até 50km². O autor concluiu que a metodologia proposta apresentou bons resultados quando confrontadas com a do SCS, apesar de o modelo possuir algumas limitações de aplicabilidade e não substituírem modelos que se utilizam de dados para seu ajuste.

Fadel e Dornelles (2015) analisaram a resposta de uma bacia hidrográfica em Porto Alegre, quanto a interceptação de cargas sanitárias presentes no sistema pluvial por meio de coleta de tempo seco, utilizando modelagem chuva-vazão pelo Método SCS – Hidrograma Unitário. Os autores concluíram que o sistema de interceptação proposto apresentou resultados significativos, com desvio do efluente sanitário chegando a um nível de aproximadamente 85%.

Silva *et al* (2008) buscaram em seu trabalho a avaliar a aplicação do Modelo Conceitual de Nash para geração do hidrograma comparando com os dados observados de escoamento superficial na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande. Concluíram que o modelo de Nash se mostrou adequado para a modelagem do escoamento, embora subestimasse a vazão de pico. Outro ponto de destaque é que os autores conseguiram definir parâmetros “n” e “k” representativos para as estações consideradas chuvosas e outro para as secas através de uma análise de sensibilidade dos parâmetros.

Já Sartori *et al* (2005) propuseram uma extensão da adaptação proposta por Lombardi Neto *et al* (1989), que apresentaram uma adaptação do Método SCS para bacias hidrográficas brasileiras. Os autores realizaram seus estudos em bacias hidrográficas do estado de São Paulo e propuseram a metodologia para todos os solos do Brasil, com a ressalva de que a aplicação em regiões muito secas ou muito úmidas como é o caso do Nordeste, Pantanal e Amazônia devem ser realizadas com cautela.

Cunha *et al* (2015) analisou o processo chuva -vazão na bacia hidrográfica do ribeirão Serra Azul sob dois cenários: i) modelagem pelo Método CN-SCS e ii) calibração do CN a partir da variação com a altura de chuva e o hidrograma unitário derivado a partir de dados de linigráficos. Os autores observaram que o método SCS tende a superestimar o volume escoado e as vazões de pico, enquanto que o modelo ajustado forneceu resultados com menor erro percentual em relação aos eventos monitorados.

3 ANÁLISE DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO O HIDROGRAMA UNITÁRIO CONCEITUAL DE NASH NA BACIA DO RIO SANTANA

Analysis of the rain-flow process using the Nash conceptual unit hydrograph in the
Santana River Watershed

Thiago Augusto Terra, Flávio Aparecido Gonçalves, Leonardo Santos Barbosa
Revista Engenharia Sanitária e Ambiental
Submetido em: 09/02/2021

RESUMO

O processo de modelagem da vazão a partir da precipitação é um dos desafios que a hidrologia se propõe a resolver. Por se tratar de sistemas complexos, com diversas variáveis envolvidas, a vazão, muitas vezes, é tratada como resposta de um modelo que é função de alguma variável específica. O modelo de Nash (1957) considera a bacia hidrográfica como um sistema linear que é função de dois parâmetros: número de reservatórios (n); e taxa de decaimento (k). Por meio da série de dados de precipitação e vazão, encontra-se, para cada evento, valores numéricos para estes parâmetros que podem ser utilizados para modelar futuros eventos. Neste trabalho, objetivou-se encontrar um hidrograma unitário médio representativo para a bacia hidrográfica do rio Santana, a partir de 42 eventos de precipitação, e analisar a influência que os parâmetros possuem principalmente na vazão de pico e no tempo de pico. Para a separação do escoamento subterrâneo foi utilizada a análise gráfica; para determinação dos parâmetros “ n ” e “ k ” foi utilizado o método dos momentos e convolução do vetor de escoamento superficial unitário para modelagem do hidrograma. Encontrou-se os valores de “ n ” igual a 4,37 e “ k ” igual 22,91 para a média dos 42 eventos. Estes eventos apresentaram os melhores resultados para modelagem, mesmo quando comparados com os eventos selecionados segundo as considerações de Phillip (2002). Observou-se, ainda, uma forte correlação entre os parâmetros “ n ” e “ k ” com coeficiente de Pearson igual a -0,73. Foi possível também observar uma forte correlação entre “ k ” e vazão de pico, com Pearson igual a 0,63 para os eventos selecionados e Pearson de 0,42 indicando a correlação entre “ n ” e tempo de pico. Concluiu-se que o hidrograma unitário médio representativo pode ser utilizado para modelagens de eventos futuros para esta bacia hidrográfica, por atingir um nível de correlação satisfatório, com coeficiente de determinação igual a 0,797, apesar de constatar que ele subestima a vazão de pico e superestima o

tempo de pico.

Palavras chave: Deflúvio superficial, Modelagem hidrológica, Precipitação efetiva.

ABSTRACT

The process of modeling the flow from precipitation is one of the challenges that hydrology proposes to solve. Because they are complex systems, with several variables involved, the flow is often treated as a model response that is a function of a specific variable. Nash's model (1957) considers the basin as a linear system that is a function of two parameters: number of reservoir (n) and decay rate (k). Through the series of precipitation and flow data, it is possible to find, for each event, numerical values for these parameters that can be used to model future events. In this work, the objective was to find a representative average unit hydrograph for the Santana river basin, through 42 precipitation events, and to analyze the influence that the parameters have mainly on the peak flow and peak time. For the separation of the underground flow, graphic analysis was used; to determine the parameters n and k , the method of moments and convolution of unitary surface flow vector was used to model the hydrograph. Values of n equal to 4.37 and k equal to 22,91 were found for the mean of the 42 events. These events presented the best results for modeling, even when compared with the events selected according to the considerations of Phillip (2002). There was a strong correlation between parameters n and k with Pearson's coefficient equal to -0,73. It was also possible to observe a strong correlation between k and peak flow, with Pearson equal to 0,63 for the selected events and a Pearson of 0,42 indicating the correlation between n and peak time.

It was concluded that the representative average unit hydrograph can be used for modeling future events for this basin, as it reaches a satisfactory level of accuracy, with R^2 equal to 0,797, despite finding that it underestimates the peak flow and overestimates the time of discharge peak.

Keywords: Surface runoff, Hydrological modeling, Effective precipitation.

INTRODUÇÃO

Bacias hidrográficas são sistemas físicos complexos pelos quais a água se desloca. Considerado como um dos principais seguimentos do ciclo hidrológico, o escoamento superficial é o processo de deslocamento da água pela superfície da

Terra, que pode ser dividido em dois componentes: o subterrâneo; e o superficial. O primeiro se caracteriza em toda parcela da precipitação que infiltra no solo ou fica interceptada na vegetação; já, o segundo, é caracterizado pela parcela da precipitação que realmente se converte em escoamento, após o solo já estar umedecido e com a capacidade de infiltração reduzida, também conhecida como precipitação efetiva (SILVA *et al*, 2008).

A hidrologia busca conceituar e modelar diferentes processos que interagem sob condições variáveis no espaço e no tempo (SCHULER, 2003). Quintela e Portela (2002) estudaram modelos hidrológicos desenvolvidos e aplicados em Portugal no período de 1975 – 2000, classificando os modelos em dois grupos: modelos determinísticos; e não determinísticos. Os determinísticos, que se dividem em empíricos, conceituais, ou semi-conceituais, analisam as cheias, simulação de escoamentos fluviais e modelagem de segmentos limitados do ciclo hidrológico, baseando-se em características físicas da bacia hidrográfica. Já os não determinísticos, ou probabilísticos e estocásticos, são utilizados principalmente para eventos extremos, como cheias e precipitações intensas.

Tucci (2003) considera que a determinação do hidrograma de projeto de uma bacia hidrográfica depende de dois componentes, sendo eles a separação do volume de escoamento superficial e a propagação deste volume para jusante; e afirma que este último componente geralmente utiliza a teoria dos sistemas lineares, ou seja, hidrograma unitário (HU). Innocente (2016) em seu trabalho, classifica os hidrogramas unitários em i) sintéticos, onde o HU é definido exclusivamente a partir de características físicas da bacia hidrográfica; ii) conceitual, onde os parâmetros do HU são determinados apenas por calibração de série de dados; iii) geomorfológicos, sendo uma subdivisão dos sintéticos, o qual seus parâmetros são características geomorfológicas da bacia hidrográfica.

Nash (1957) apresenta um modelo conceitual para determinação de vazão o qual se baseia em uma resposta linear da bacia hidrográfica perante um pulso de precipitação efetiva, sendo o que o processo de escoamento se dá por meio de um sistema estacionário com 'n' reservatórios em cascata que distribuem vazão a uma taxa 'k' de decaimento. O modelo é calibrado perante essas duas variáveis sendo que elas se comportam de maneira linear. Este estudo justifica na busca por melhor entendimento da modelagem chuva-vazão em bacias pouco urbanizadas e de médio porte de área de drenagem e tem como objetivo a análise da modelagem do

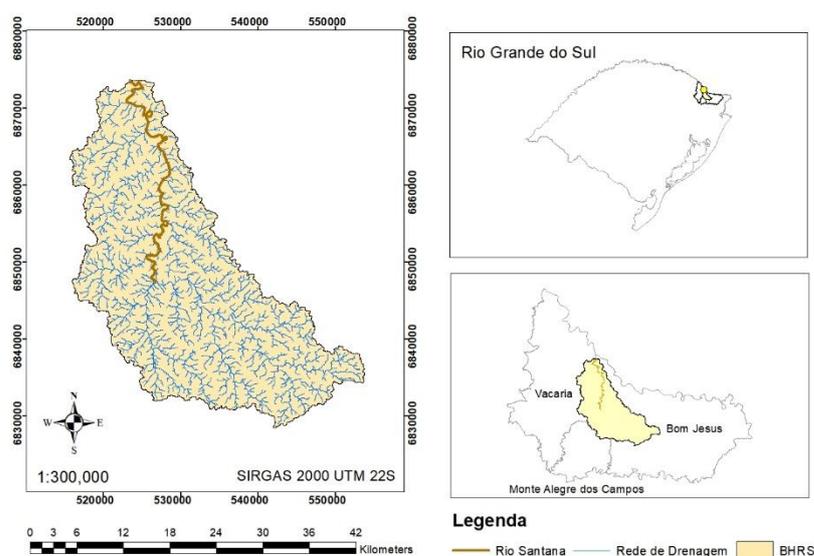
escoamento superficial pelo método do hidrograma unitário proposto por Nash na bacia hidrográfica do rio Santana, no Rio Grande do Sul.

MATERIAIS E MÉTODOS

BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTANA

O presente estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Rio Santana (BHRS), com informações obtidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que abrange os municípios de Vacaria, Bom Jesus e Monte Alegre dos Campos no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 6 - Localização da BHRS

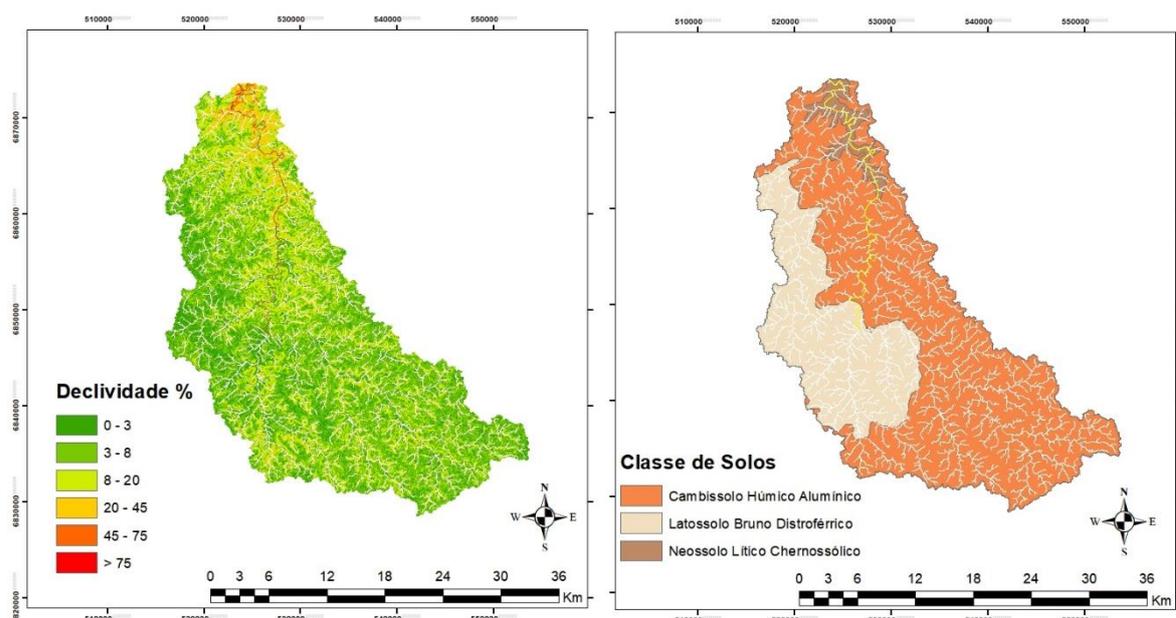


Fonte: Do autor.

A BHRS, localizada nas coordenadas de exutório 523490 W e 6873565 S, fuso 22S, é uma das cinco estações telemétricas instaladas em afluentes do Rio Pelotas, que são utilizadas para previsões de vazões de afluência para a Usina Hidrelétrica Barra Grande e possui área de drenagem de 790 km², com boa densidade de drenagem de 2,35 km.km⁻², e coeficiente de compacidade de 2,20, caracterizando uma bacia hidrográfica com menor propensão a grandes enchentes. O clima é definido pelo subtipo Cfv, que indica um clima temperado com verão ameno. A precipitação anual varia de 1100 a 2000 mm, não apresentando uma estação seca bem definida, com temperatura média do mês mais quente sendo inferior a 22°C. O relevo está concentrado predominantemente entre plano (24,50 % da área), em que a declividade está entre 0% a 3%; suave ondulado (46,30 % da área) em que a declividade varia entre 3% e 8%; e ondulado (24,88% da área), em

que a declividade está entre 8% e 20%. A BHRS apresenta três tipos de solos predominantes em toda sua extensão. O Cambissolo Húmico Alumínico (CHA), presente em 68,05% da área, com características de solo argiloso; Latossolo Bruno Distroférico (LBdf), em 28,16 % da área, com característica muito argilosa; e o Neossolo Lítico Chernossólico (Rlm), em 3,79 % da área, com característica de solo cascalhento, principalmente em áreas com maior declividade.

Figura 7 - Mapas de declividade e classes de solo da BHRS



Fonte: Do autor.

HIDROGRAMA CONCEITUAL DE NASH

Os reservatórios simulam uma situação de amortização da vazão de pico e outra de propagação. Fisicamente, a facilidade com que o reservatório drena o escoamento é representada por um parâmetro “k”, que reflete a resposta da bacia hidrográfica ao ser condicionada por um ou mais eventos de precipitação efetiva (TUCCI, 1998). O número de reservatórios em sequência linear é a definição do parâmetro “n”. Tomando-se dois reservatórios diferentes em série, com constantes “k₁” e “k₂”, 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 (SILVA *et al*, 2016):

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

Resolvendo-se a integral da Equação (1) e se considerando dois reservatórios iguais, obteremos:

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

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

Para três reservatórios:

$$u(0,t) = \frac{t^2}{2 \cdot k^3} \cdot (e^{-\frac{t}{k}}), \quad (4)$$

Generalizando:

$$u(0,t) = \frac{t^{n-1}}{k^n \cdot (n-1)!} \cdot e^{-t/k}, \quad (5)$$

A Equação (5) pode ser representada, genericamente, da seguinte forma:

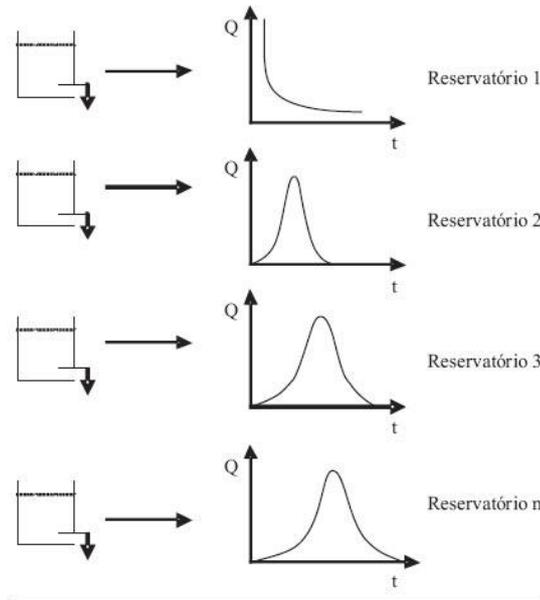
$$u(0,t) = \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot \frac{e^{-t/k}}{k \cdot \tau(n)}, \quad (6)$$

A Equação (6) é conhecida como modelo conceitual de Nash para HCN, considerando-se 'n' reservatórios lineares representando a situação esquematizada na Figura 8.

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:

$$h(t) = \int_0^1 \frac{1}{k} \left(\frac{t-\tau}{k}\right)^{n-1} \cdot \frac{e^{-(t-\tau)/k}}{\tau(n)} d\tau, \quad (7)$$

Figura 8 - Representação esquemática do modelo de Nash para “n” reservatórios



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

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

$$h(t) = \frac{D}{3} (y_1 + 4y_2 + 2y_3 + \dots + 2y_{m-1} + 4y_m + y_{m+1}), \quad (8)$$

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

$$[Q] = [h(t)].[Pe], \quad (9)$$

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. Matricialmente, a convolução é apresentada na Figura 9.

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

$$m1(HCN) = m1S-m1E, \quad (10)$$

$$m2(\text{HCN}) = m2S - m2E, \quad (11)$$

Figura 9 - Exemplo de convolução em forma matricial com três pulsos de precipitação efetiva

$$\begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_2 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_3 & P_2 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_3 & P_2 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & P_2 & P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_3 & P_2 & P_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 & P_2 & P_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 & P_2 & P_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 & P_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HU_1 \\ HU_2 \\ HU_3 \\ HU_4 \\ HU_5 \\ HU_6 \\ HU_7 \\ HU_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 HU_1 \\ P_1 HU_2 + P_2 HU_1 \\ P_1 HU_3 + P_2 HU_2 + P_3 HU_1 \\ P_1 HU_4 + P_2 HU_3 + P_3 HU_2 \\ P_1 HU_5 + P_2 HU_4 + P_3 HU_3 \\ P_1 HU_6 + P_2 HU_5 + P_3 HU_4 \\ P_1 HU_7 + P_2 HU_6 + P_3 HU_5 \\ P_1 HU_8 + P_2 HU_7 + P_3 HU_6 \\ P_2 HU_8 + P_3 HU_7 \\ P_3 HU_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ Q_7 \\ Q_8 \\ Q_9 \\ Q_{10} \end{bmatrix}$$

Fonte: Innocente (2016).

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:

$$m1S = \frac{\sum Q_i t_i}{\sum Q_i}, \quad (12)$$

$$m2S = \frac{\sum Q_i t_i^2}{\sum Q_i} - m1S^2, \quad (13)$$

$$m1E = \frac{\sum P_i t_i}{\sum P_i}, \quad (14)$$

$$m2E = \frac{\sum P_i t_i^2}{\sum P_i} - m1E^2, \quad (15)$$

Introduzindo-se esses termos nas Equações 16 e 17, e os resolvendo, tem-se:

$$k = \frac{m2S - m2E}{m1S - m2E}, \quad (16)$$

$$n = \frac{(m1S - m1E)^2}{m2S - m2E}, \quad (17)$$

Portanto, tem-se dois parâmetros para calibração desse hidrograma: n e k . O número de reservatórios interfere no tempo do pico, e o decaimento na altura do pico, conforme mostrado na Figura 5.

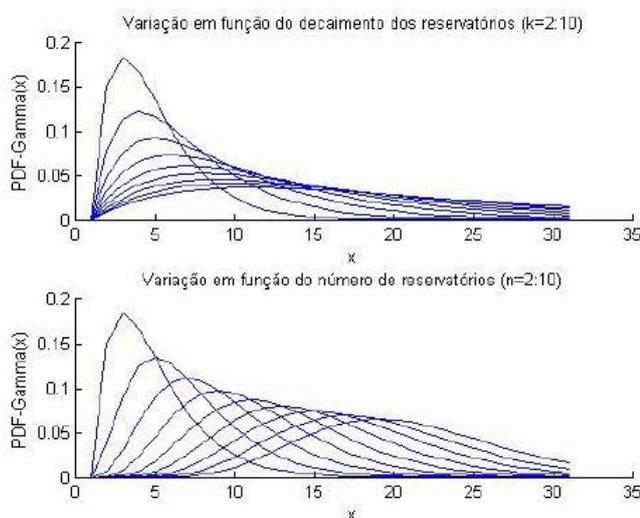
Para avaliação do desempenho do modelo perante o evento observado, será utilizado o Coeficiente de Nash e Sutcliffe, Equação 18. Este coeficiente é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliação de modelos hidrológicos (Silva *et al*, 2008).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{est} - Q_{med})^2}, \quad (18)$$

HIDROGRAMA UNITÁRIO MÉDIO

Phillip (2002) recomenda em seu estudo que algumas premissas devem ser consideradas ao se aplicar o modelo de hidrograma unitário, sendo uma delas de que a precipitação efetiva deva estar entre 12,7 e 50,8 mm.

Figura 10 - Influência dos parâmetros “ n ” e “ k ” na função densidade e probabilidade



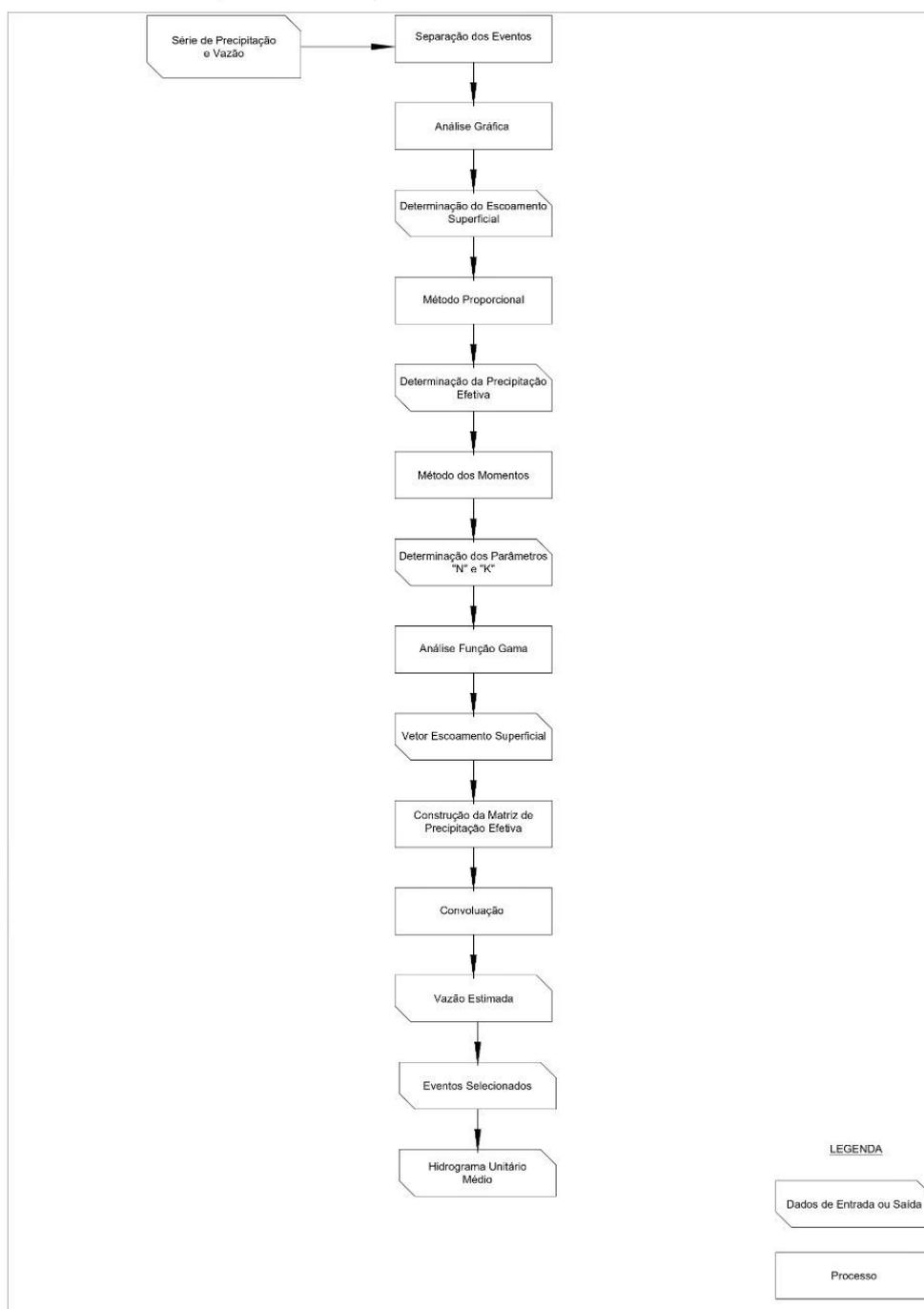
Fonte: Innocente, 2016.

Os eventos que atenderam a esta condição foram selecionados a fim de se construir um hidrograma unitário médio representativo da bacia hidrográfica do Rio

Santana. Foram definidos novos valores para os parâmetros “n” e “k”, com base na média dos parâmetros dos eventos selecionados. Posteriormente, foi feita uma estimativa de modelagem para comparação com os valores médios e foi analisado segundo o coeficiente de Nash Sutcliffe.

Na Figura 6 está representado o fluxograma de trabalho demonstrando passo a passo os arquivos de entrada/saída e os processos realizados para se chegar ao hidrograma unitário médio da BHRS.

Figura 11 - Fluxograma demonstrando as principais do trabalho

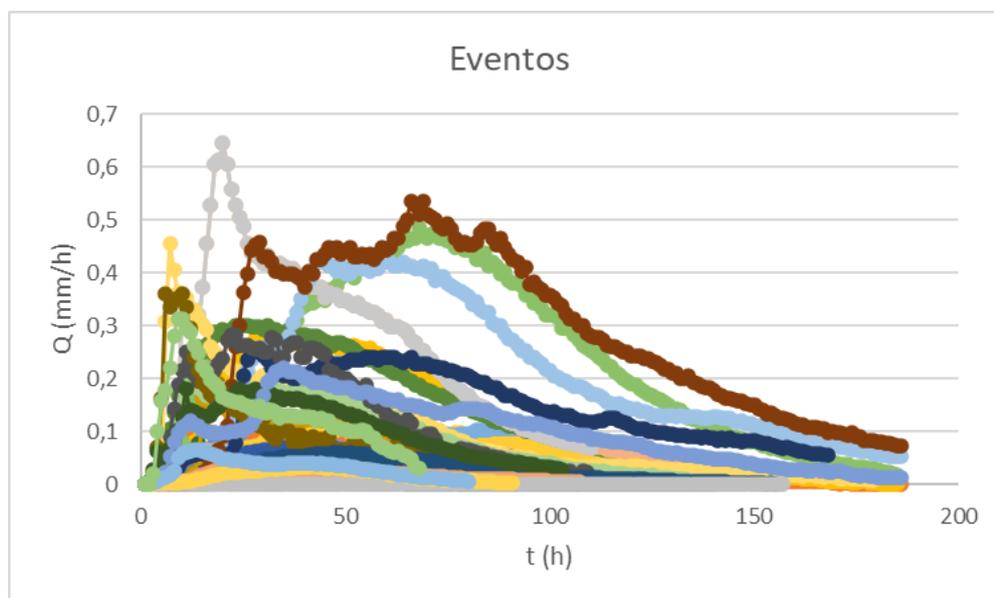


Fonte: Do autor.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 7 estão apresentados os hidrogramas resultantes dos 42 eventos utilizados neste estudo. Estes eventos foram normalizados para que fossem calibrados quanto as duas variáveis, “n” e “k”, que são fundamentais neste tipo de modelo estacionário linear.

Figura 12 - Hidrogramas dos 42 eventos encontrados a partir do modelo de Nash



Fonte: Do autor.

Adotando o procedimento exposto no fluxograma da Figura 6, foram estimados 42 modelos com base nos parâmetros de cada evento. Para cada modelo estimado, foi calculado o coeficiente de Nash e Sutcliffe e os eventos com coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,75 foram utilizados para calibração. Na Tabela 1, do Anexo 1, estão apresentados os resultados “n”, “k” e R^2 para cada evento.

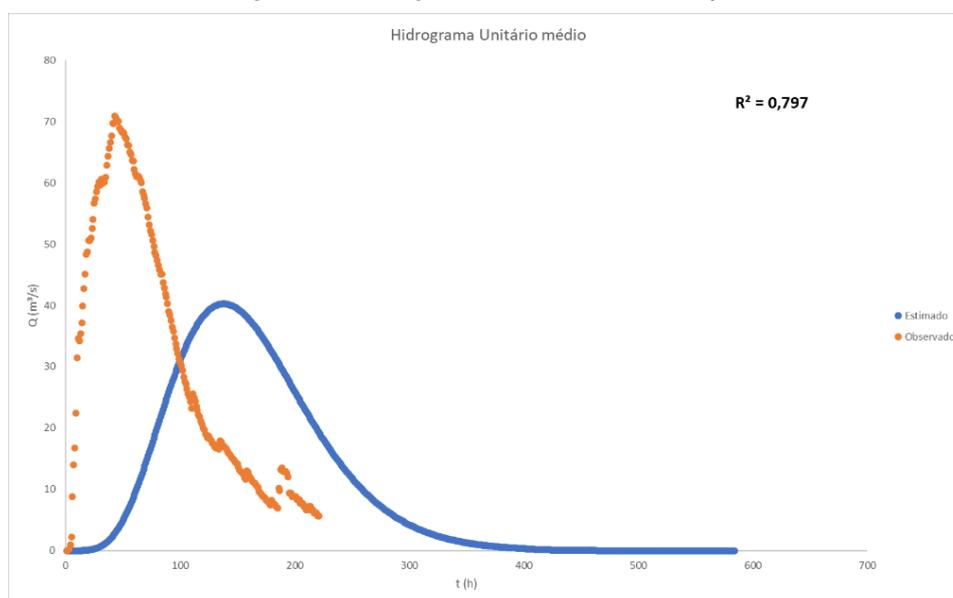
A calibração dos parâmetros, resultou em valores médios de $n = 4,36$ e $k = 22,90$. Estes valores não podem ser confrontados com outros trabalhos do ponto de vista absoluto, mas podem ser confrontados quanto ao nível de ajuste encontrados em outros trabalhos, Innocente (2016) encontrou correlação entre “n” e “ T_p/T_b ” com Pearson igual a 0,84 para o método de distribuição de precipitação efetiva proporcional. Silva *et al* (2008) afirma ter encontrado que encontrou baixa variabilidade no coeficiente de variação e ainda diz ser possível uma combinação específica para a sub-bacia do Ribeirão Marcela.

Adotando as considerações de Phillip (2002), foram analisadas as

precipitações efetivas dos 42 eventos. Portanto, os que atendiam esta condição foram separados, resultando em 13 eventos. Isto possibilitou os cálculos dos valores médios de “n” e “k” destes eventos selecionados e foi gerado o vetor de escoamento superficial. Construiu-se uma matriz de precipitação efetiva com os valores médios destes eventos e, após o processo de convolução, chegou-se em um hidrograma unitário médio e sua modelagem, com R^2 no valor de 0,797, conforme apresentado na Figura 8.

Com este valor de R^2 pode-se considerar que a modelagem realizada atingiu um resultado satisfatório, pois o processo de modelagem chuva-vazão é considerado de extrema complexidade e atingir tal valor para um modelo que se leva em consideração apenas duas variáveis, é um resultado significativo.

Figura 13 - Hidrograma médio e sua convolução

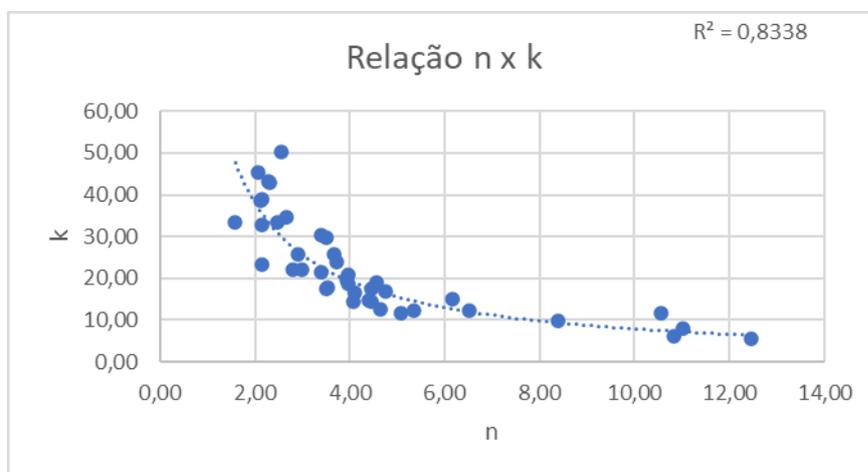


Fonte: Do autor.

Outro ponto a se considerar é que essa modelagem subestima a vazão de pico (Q_p) e superestima o valor do tempo de pico (t_p), fato este observado na modelagem de todos os eventos individuais analisados. O motivo pelo qual este fenômeno acontece ainda é incerto e causa ampla discussão entre diversos autores, Dooge (1973), Beven e Binley (1992), Toddini (1998), pois, fundamentalmente, Nash propôs o modelo de hidrograma unitário correlacionando a variável “n” com o tempo de pico, e a variável “k” com a vazão de pico. Entretanto, fatores físicos da bacia hidrográfica como o tipo de solo e o seu uso, tempo de concentração e declividade do corpo hídrico, também possuem sua influência e não foram utilizados nesta análise, assim como a umidade antecedente do solo.

Contudo, há uma forte correlação entre os parâmetros “n” e k, atingindo correlação de -0,73, conforme se pode observar na Figura 9, que traz todos os valores de “n” e “k” para todos os eventos.

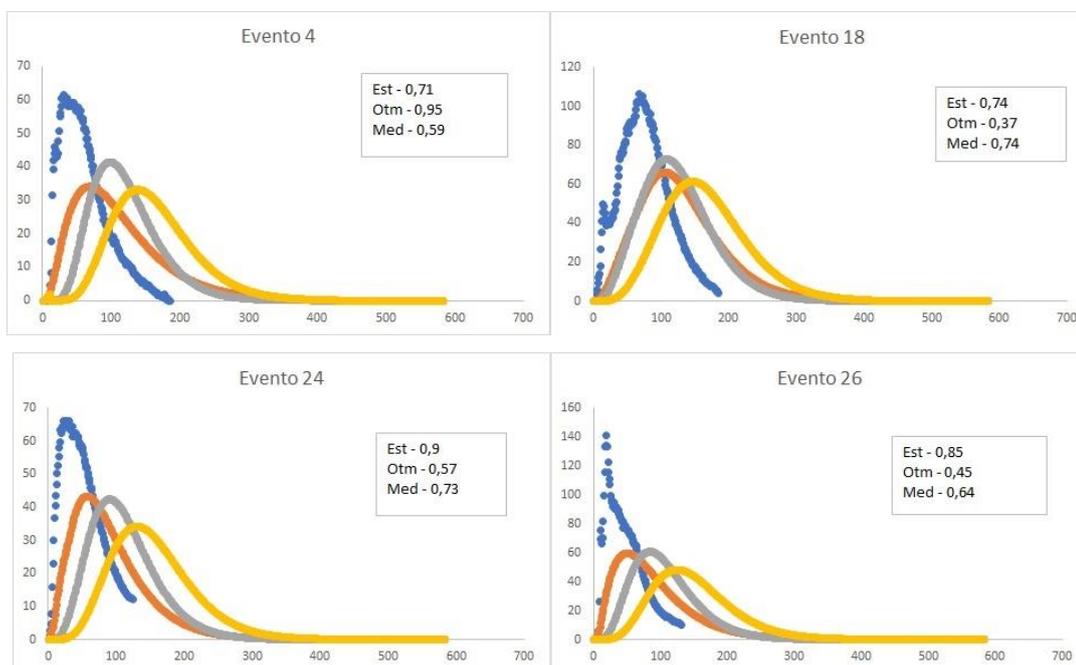
Figura 14 - Correlação entre “n” e “k”

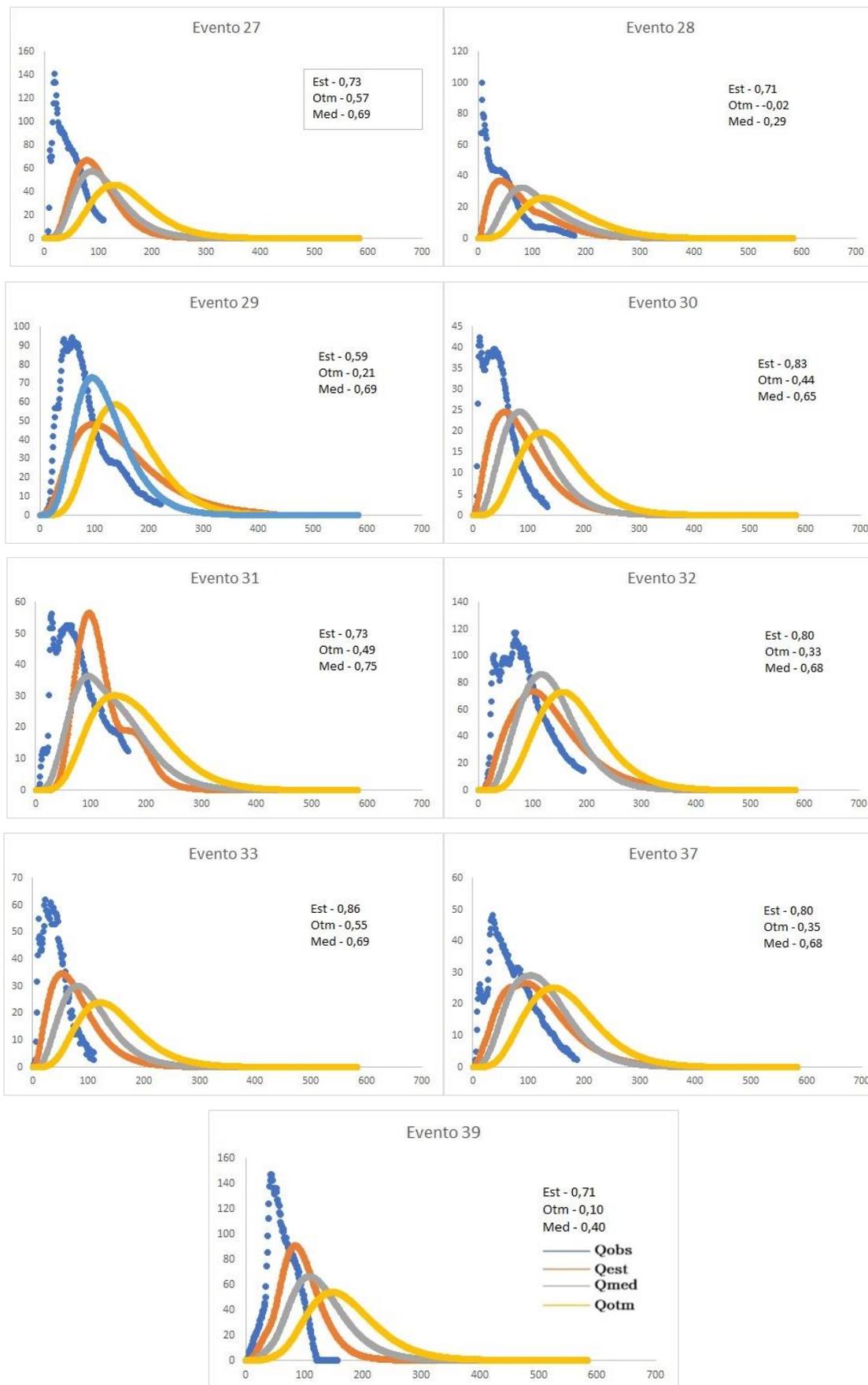


Fonte: Do autor.

Com a intenção de analisar qual dos modelos retornaria o maior valor de R^2 , foram realizadas três modelagens para cada um dos 13 eventos, sendo: a) “n” e “k” do próprio evento (Qest); b) “n” e “k” médios (Qmed); c) “n” e “k” selecionados (Qotm). Na Figura 10 estão apresentados cada um dos 13 hidrogramas, onde se tem os dados observados e os modelados juntamente com o valor de R^2 para cada modelagem.

Figura 15 - Hidrogramas de cheia observados e modelados a partir do modelo conceitual de Nash





Fonte: Do autor.

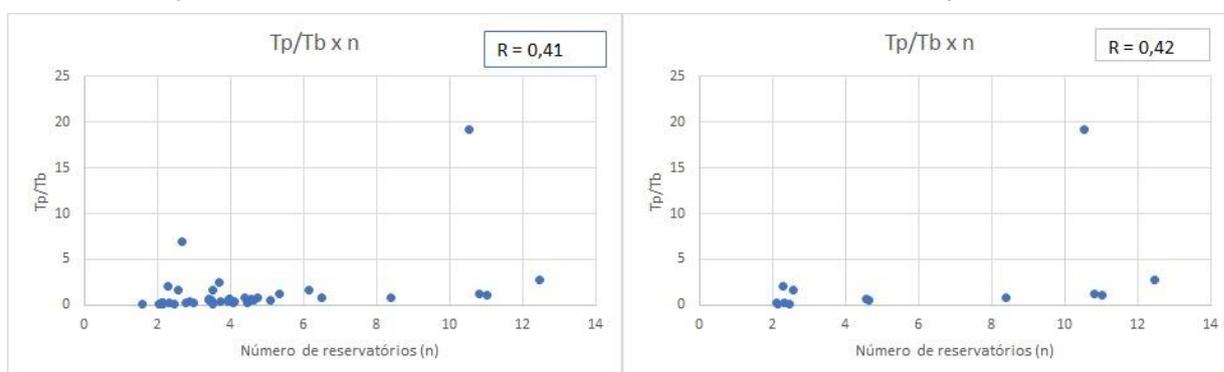
Na maioria dos hidrogramas apresentados na Figura 10, observamos que a

melhor modelagem se refere aos parâmetros estimados, até pelo fato de visualmente, ser a modelagem que mais se aproxima do observado. Isto se deve pelos valores de “n” e “k” estimados serem os que melhor refletem as características individuais de cada evento. Eventos que tem a vazão de pico muito elevada, com um pequeno tempo de pico, ou seja, eventos muito intensos ocorrem com uma frequência muito baixa, portanto são muito peculiares. Assim sendo, a modelagem que melhor os representa é a Q_{est} .

De um modo geral, a modelagem baseada em parâmetros médios (Q_{med}), apresentou bons coeficientes de eficiência, principalmente em eventos cuja a precipitação se deu de uma forma mais distribuída no tempo, sem picos de vazão muito elevados. Tal fato reforça a tese de Silva (2008) de ser possível encontrar uma combinação específica dos parâmetros “n” e “k” para a bacia.

Na Figura 11 é possível observar a influência do parâmetro “n” no tempo de pico (t_p) em relação ao tempo de base (t_b). Quando analisamos somente os 13 eventos considerados ótimos, observamos uma maior correlação entre os fatores, pois o coeficiente de Pearson atingiu o valor de $R = 0,42$, sendo que quanto mais próximo de 1 (valor unitário), mais os conjuntos de dados analisados se correlacionam linearmente. O mesmo se observa ao se analisar todos os eventos, com R atingindo 0,41.

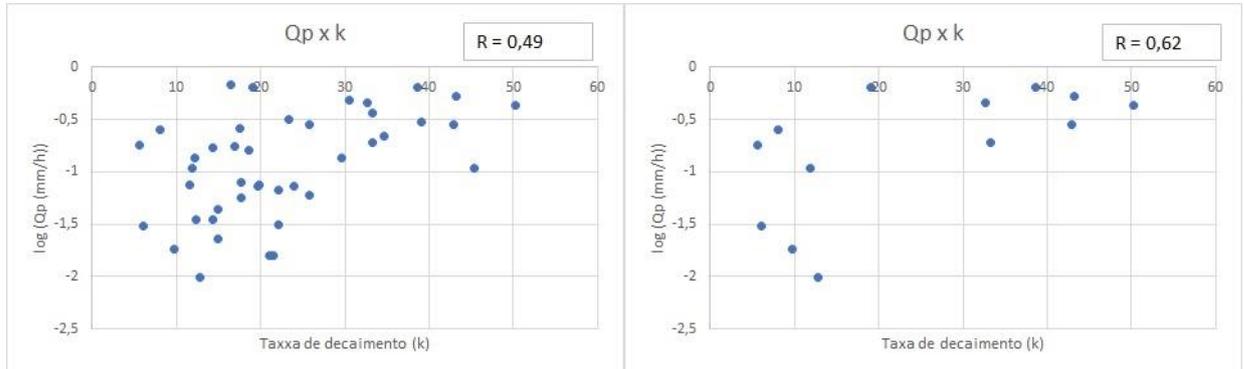
Figura 16 - Influência do parâmetro número de reservatórios na determinação do tempo de pico



Outro ponto destacado por Nash (1957) é que o parâmetro k (taxa de decaimento) exerce influência direta sobre a vazão de pico (Q_p), fato este comprovado ao se analisar a Figura 12, que mostra primeiramente um R de 0,55 para os eventos selecionados e de 0,49 para todo os eventos observados neste

estudo.

Figura 17 - Influência do parâmetro taxa de decaimento (k) na determinação da vazão de pico (Q_p)



CONCLUSÕES

Este trabalho analisou diferentes modelagens de deflúvio utilizando-se do hidrograma unitário conceitual proposto por Nash em 1957. Foram utilizados 42 eventos com série de dados de vazão e precipitação.

A modelagem de cada evento alcançou representatividade significativa, sendo que o valor médio de coeficiente de determinação (R^2) para os 42 eventos foi igual a 0,77, sendo a maioria deles maior que 0,75.

Foi observado que o modelo de Nash subestima os valores de vazão de pico e superestima os valores de tempo de pico. Fato este observado para cada modelagem isolada e também para o hidrograma unitário médio.

Há uma forte correlação entre os parâmetros “n” e “k” com coeficiente de Pearson atingindo 0,83.

O hidrograma médio calibrado apresenta bons resultados para modelagens de eventos futuros, entretanto, recomenda-se uma categorização quanto a duração do evento e precipitações totais, tendo um hidrograma médio para cada categoria.

Há correlação entre o número de reservatório (n) e o tempo de pico (t_p), assim como há correlação entre a taxa de decaimento (k) e a vazão de pico (Q_p).

De forma geral, a modelagem da vazão por meio do hidrograma unitário conceitual de Nash produziu bons resultados para a bacia hidrográfica do Rio Santana, mesmo que esta técnica não seja a mais indicada para bacias de médio porte, os resultados alcançados mostraram-se satisfatórios.

APÊNDICE A – Dados dos Eventos

Tabela 3: Valores dos parâmetros relacionados a cada evento de estudo.

(continua)

Evento	P ef (mm)	Deflúvio (m ³ /s)	Parâmetros Nash			Parâmetros médios			R ²
			n	k	nk	n	k	nk	
1	6,07	1332,93	6,51	12,17	79,23	4,37	22,91	79,20	0,47
2	8,56	1879,68	2,06	45,32	93,36	4,37	22,91	79,20	0,78
3	3,09	679,63	5,09	11,60	59,04	4,37	22,91	79,20	0,78
4	20,73	4550,15	2,32	42,95	99,64	4,37	22,91	79,20	0,71
5	4,06	892,86	3,94	19,84	78,17	4,37	22,91	79,20	0,88
6	3,04	667,20	3,73	23,91	89,18	4,37	22,91	79,20	0,84
7	1,04	228,64	4,41	14,86	65,53	4,37	22,91	79,20	0,87
8	0,86	189,70	3,96	20,99	83,12	4,37	22,91	79,20	0,85
9	0,86	225,74	3,41	21,54	73,45	4,37	22,91	79,20	0,86
10	9,44	2071,71	4,45	17,55	78,10	4,37	22,91	79,20	0,80
11	1,30	286,68	3,00	22,10	66,30	4,37	22,91	79,20	0,61
12	6,10	1340,51	4,07	14,29	58,16	4,37	22,91	79,20	0,74
13	3,49	754,71	3,51	17,62	61,85	4,37	22,91	79,20	0,69
14	2,38	523,42	6,16	14,96	92,15	4,37	22,91	79,20	0,65
15	7,46	1637,06	4,74	16,97	80,44	4,37	22,91	79,20	0,64
16	10,04	2203,67	3,50	29,65	103,78	4,37	22,91	79,20	0,78
17	8,51	1869,33	10,55	11,83	124,81	4,37	22,91	79,20	0,57
18	41,83	9179,87	3,40	30,50	103,70	4,37	22,91	79,20	0,74
19	3,79	833,80	3,95	19,64	77,58	4,37	22,91	79,20	0,86
20	1,39	305,33	4,45	14,31	63,68	4,37	22,91	79,20	0,85
21	2,44	537,17	3,52	17,69	62,27	4,37	22,91	79,20	0,93
22	8,44	1854,10	3,97	18,66	74,08	4,37	22,91	79,20	0,80
23	0,33	74,15	4,65	12,72	59,15	4,37	22,91	79,20	0,53
24	21,70	4762,52	2,16	39,09	84,43	4,37	22,91	79,20	0,90
25	0,74	163,84	8,39	9,73	81,63	4,37	22,91	79,20	0,79
26	29,95	6573,03	2,11	38,69	81,64	4,37	22,91	79,20	0,85
27	28,72	6302,98	4,56	19,08	87,00	4,37	22,91	79,20	0,73
28	17,71	3899,75	2,16	32,70	70,63	4,37	22,91	79,20	0,71
29	38,19	8381,05	2,56	50,31	128,79	4,37	22,91	79,20	0,60
30	12,47	2737,97	2,48	33,28	82,53	4,37	22,91	79,20	0,83
31	23,45	5146,07	11,03	7,97	87,91	4,37	22,91	79,20	0,73
32	50,53	11089,82	2,28	43,26	98,63	4,37	22,91	79,20	0,80
33	14,94	3279,18	2,90	25,78	74,76	4,37	22,91	79,20	0,86
34	8,97	1969,85	1,59	33,29	52,93	4,37	22,91	79,20	0,90
35	3,91	859,71	3,68	25,81	94,98	4,37	22,91	79,20	0,71
36	10,51	2306,66	12,46	5,61	69,90	4,37	22,91	79,20	0,73
37	18,05	3961,13	2,67	34,71	92,68	4,37	22,91	79,20	0,80
38	1,82	399,41	10,83	6,11	66,17	4,37	22,91	79,20	0,82

Tabela 3: Valores dos parâmetros relacionados a cada evento de estudo.

(conclusão)

Evento	P ef (mm)	Deflúvio (m ³ /s)	Parâmetros Nash			Parâmetros médios			R ²
			n	k	nk	n	k	nk	
39	34,86	7650,90	4,10	16,44	67,40	4,37	22,91	79,20	0,71
40	1,61	353,18	5,34	12,32	65,79	4,37	22,91	79,20	0,86
41	2,57	564,29	2,79	22,16	61,83	4,37	22,91	79,20	0,91
42	9,14	2006,09	2,14	23,32	49,90	4,37	22,91	79,20	0,94

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira geral, este trabalho de modelagem por meio do método proposto por Nash (1957) apresentou bons resultados na bacia hidrográfica do Rio Santana. Entretanto, algumas considerações devem ser realizadas no sentido de alcançar resultados mais significativos.

Phillip (2002) recomenda que este modelo deva ser utilizado para bacias hidrográficas com área de 2,6 a 256 km², sendo que a bacia deste estudo possui 720 km². Bacias menores tendem a ter menor variabilidade na intensidade de precipitação, ou seja, pode-se considerar que a precipitação ocorre de maneira constante no espaço e no tempo, o que é uma das premissas conceituais do modelo.

Os dados utilizados nesta análise foram coletados no intervalo de tempo de uma hora. Tal intervalo de tempo é considerado muito alto devido as variações de intensidade que um evento específico pode apresentar. Isto pode ter atrapalhado na separação dos eventos, podendo dois ou mais eventos serem considerados como apenas um. Recomenda-se seguir o filtro proposto por Phillip (2002) que propõe a utilização de eventos com duração de precipitação efetiva deve ser de 25 a 30% o tempo entre o centro de massa da precipitação efetiva ao pico do hidrograma.

Recomenda-se também a utilização de outros componentes do ciclo hidrológico que possuem influência significativa no balanço de massa do sistema, como é o caso da evaporação.

REFERÊNCIAS

- AGIRRE, U. *et al.* Application of a unit hydrograph based on sub watershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. **Journal of Hydrology**. Catena, v. 64, p. 321-332, 2005.
- BEVEN, K. J. BINLEY, A. M., The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. **The Open Hydrology Journal**. Process., 6, 279-298. 1992.
- BEVEN, K.J. **Rainfall Runoff Modelling: The Primer**. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012. 488p.
- BHUNYA, P. K.; PANDA, S. N.; GOEL, M. K. Synthetic unit hydrograph methods: a critical review. **The Open Hydrology Journal**, v. 5, n. 1, 2011.
- CASERI, A. *et al.* Generating precipitation ensembles for flood alert and risk management. **Journal of Flood Risk Management**. Aix-En-Provence, p. 402-415. set. 2016.
- CLARKE, R. T., **Mathematical models in hydrology**. 1. Ed. Roma: FAO, 1973. 282p.
- CLARK, C. O. Storage and the unit hydrograph. *In*: Transactions, 9., 1945, Los Angeles. **Proceedings** of the American Society of Civil Engineers. Los Angeles: University of Southern California, 1945. p. 1333-1360.
- CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de Sistemas Ambientais. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p.
- CUNHA, L. K. **Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004.
- CUNHA, S. F. *et al.* Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 1, p. 837-848, 2015.
- DOOGE, J. C. I.; A general theory of the unit hydrograph. **Journal of geophysical research**, v. 64, n. 2, p. 241-256, 1959.
- DOOGE, J. C. I. **Linear theory of hydrologic systems**. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1973. 339p.
- DOOGE, J. C. I., **Linear Theory of Hydrologic Systems**. **Technical Bull.** No. 1468. U. S. Department of Agriculture. Washington, USA. 1978.
- DURÁN-BARROSO, P.; GONZÁLEZ, J.; VALDÉS, J. B. Improvement of the integration of Soil Moisture Accounting into the NRCS-CN model. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 542, p. 809-819, Nov. 2016. Elsevier BV.

FAYAL, M. A. de A. **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

GNECCO, Ilaria; PALLA, Anna. Hydrologic modeling of low impact development systems at urban catchment scale. **Journal of Hydrology**. Iowa City, p. 361-368. set. 2015.

GRAY, Don M. Synthetic unit hydrographs for small watersheds. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 87, n. 4, p. 33-54, 1961.

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite Vs. distributed curve number: effects on estimates of storms run of T depths. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 34, n. 5, p. 1015-1023, Oct. 1998.

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

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.147-155, 2003.

MARTINS Jr., D. **Avaliação de um modelo de simulação de lâmina e vazão máxima de escoamento superficial**. 1997. Dissertação (Mestrado em Hidrologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

MARINHO FILHO, Gilberto Milhomem *et al.* Modelos Hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, out. 2012.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos – princípios, integração e aplicação**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. 534p.

MELLO, C. R. **Estudo Hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero**. 2003. 133 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

MELLO, Carlos Rogério de; SILVA, Antônio Marciano da. **Hidrologia: Princípios e Aplicações em Sistemas Agrícolas**. Lavras: Ufla, 2013. 455p.

MOREIRA, I. A. 2005. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

NASH, J. E. The form of instantaneous units hydrograph. *In: Assembly Generale de Toronto*, 3, 1957, Toronto. **Proceedings of Hydrology**. Toronto: IAHS, 1957, p.114-

121.

NASH, J. E. Systematic determination of unit hydrograph parameters. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, n. 1, p. 111-115, 1959

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. 2019. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>. Acesso em: 26 jan. 2021.

PEIXOTO, J. P., OORT, A.H. Le cycle de l'eau et le climat. **La Recherche Spécial: L'eau**, v. 21, p.570-579, mai. 1990.

PHILIP, B. B.; WAYNE, C. H.; BAXTER, E. V. **Hydrology and floodplain analysis**. 6. ed. Houston: Rice University, 2002. 832 p.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, D. D. Comparação entre dois métodos para determinação do volume de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 403-410, abr./jun. 2001.

QUINTELA, A. C.; PORTELA, M. M. A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.7, n.4, p.51-64, 2002.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf. Acesso em 28/01/2021.

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

RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; VALDES, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water resources research**, v. 15, n. 6, p. 1409-1420, 1979.

RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; DEVOTO, G.; VALDÉS, J. B. Discharge response analysis and hydrologic similarity: the interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics. **Water Resources Research**, v. 15, n. 6, p. 1435-1444, 1979.

RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; GONZÁLEZ-SANABRIA, M.; BRAS, R. L. A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph. **Water Resources Research**, v. 18, n. 4, p. 877-886, 1982.

ROSSO, R. Nash model relation to Horton order ratios. **Water Resources Research**, v. 20, n. 7, p. 914-920, 1984.

ROJAS, R.M. **Drenaje superficial de tierras agrícolas**. Mérida: Venezuela, 1984. 96p.

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

set. 2009.

SARTORI, Aderson; LOMBARDI NETO, Francisco; GENOVEZ, Abel Maia. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Campinas, v. 10, n. 4, p. 05-18, dez. 2005.

SCS. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Conservation Service (SCS): National Engineering Handbook (NEH). Section 4: Hydrology, soil conservation service**. Washington, DC: USDA, 1972.

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.

SCHULER, A. E. **Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado em Hidrologia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2003.

SILVA, Polyanna M. de O., Mello, Carlos R. de, Silva, Antônio M. da, & Coelho, Gilberto. (2008). 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.

SHERMAN, L.K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. **Engineering News Record**, vol. 108, pp. 501–505.

SNYDER, F. F. Synthetic unit-graphs. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 19, n. 1, p. 447-454, 1938.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS, 2000. 943p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Belo Horizonte: ABRH. 2005. 678p.

TUCCI, C. E. M. Parâmetros do Hidrograma Unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 195-199, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos distribuídos**. Rhama, Porto Alegre, fev. 2010. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/modelos-hidrologicos-distribuidos/>>. Acesso em: 24.jan.2021.

VALENTINO, César Henrique. **Caracterização hidrológica e hidrossedimentológica em bacia hidrográfica com finalidades experimentais**. 2019. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2019.

VELLOSO, Sidney Geraldo Silveira *et al.* Estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial na bacia do rio São Miguel, Minas Gerais. **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v. 16, n. 3, p. 42-52, ago. 2015.

VILLELA, M. C. C. **Análise do hidrograma unitário geomorfológico e regionalização do parâmetro de velocidade.** 2001. 78 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001.

ZOCH, R. T. On the relation between rainfall and stream flow. **Monthly Weather Review**, v. 62, n. 9, p. 315-322, 1934.