



**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
ENG 1092 – TRABALHO FINAL DE CURSO II**

PEDRO SIMÕES FERREIRA MIRANDA DE ANDRADE

Monografia de TFC 2

**APLICABILIDADE DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO NA
ESTIMATIVA DE VAZÕES DE PROJETO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS**

**Goiânia,
2024**

PEDRO SIMÕES FERREIRA MIRANDA DE ANDRADE

Monografia de TFC 2

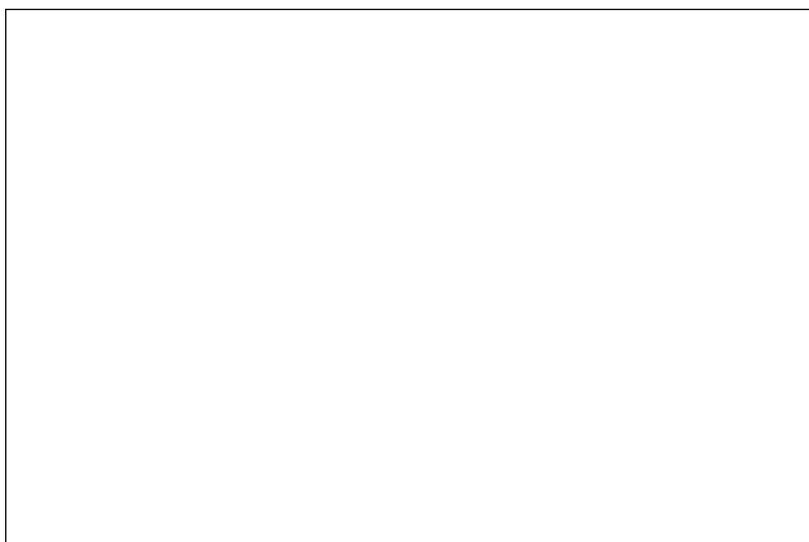
**APLICABILIDADE DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO NA
ESTIMATIVA DE VAZÕES DE PROJETO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como requisito para a obtenção de aprovação na disciplina ENG1092 – Trabalho Final de Curso II

Orientador: Prof. Dr. Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos

**Goiânia,
2024**

Ficha de identificação da obra

A large, empty rectangular box with a thin black border, positioned centrally below the title. It is intended for the user to provide identification details for the work.

TFC 2
APLICABILIDADE DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO NA
ESTIMATIVA DE VAZÕES DE PROJETO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso II foi julgado adequado para obtenção de aprovação na disciplina ENG 1092, do Curso de Engenharia Civil

Goiânia, 11 de dezembro de 2024.

Prof^a. Dr^a. Marta Pereira da Luz
Coordenadora do Curso de Engenharia Civil
Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos
Orientador - Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Prof. Paulo José Mascarenhas Roriz, Me.
1º Membro da Banca - Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Prof. Edson Nishi
2º Membro da Banca - Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Aos meus pais, mestres por profiss3o e por ess4ncia, que me ensinaram que o brilho de cada um ilumina o mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por me manter na trilha certa, concedendo-me saúde e forças para concluir este projeto de pesquisa.

Aos meus pais, Aline e Alecques, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo apoio incondicional ao longo de toda a minha trajetória.

À minha companheira de vida, Adrillenne, pela compreensão, paciência e apoio constante, durante todo o período do projeto.

Ao meu orientador, Prof. Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos, pela disposição em conduzir e orientar meu trabalho de pesquisa com dedicação.

Aos amigos que me ajudaram, com sua vasta experiência, desde o início deste projeto de pesquisa, tornando essa caminhada mais leve e enriquecedora.

A todos os meus professores do curso de Engenharia da PUC Goiás, pela excelência técnica e pelo conhecimento compartilhado, que foram essenciais para minha formação.

À memória de minha avó Sônia, por me ensinar, com amor, tantas lições que guardarei para a vida inteira.

E, finalmente, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, deixo minha mais sincera gratidão.

Se te ocorrer, de manhã, de acordares com preguiça e indolência, lembra-te destepensamento: "Levanto-me para retomar a minha obra de homem" (Marco Aurélio).

RESUMO

Este trabalho visa analisar a aplicabilidade do método do Hidrograma Unitário na estimativa de vazões de projeto em bacias hidrográficas. A pesquisa foi conduzida por meio de uma abordagem mista, que integrou métodos qualitativos e quantitativos. Na primeira fase, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, com o intuito de identificar as principais abordagens, vantagens e limitações do Hidrograma Unitário. Essa revisão baseou-se em fontes de alta qualidade e utilizou palavras-chave específicas para aprimorar os resultados. Na segunda fase, foi conduzido um estudo de caso na Bacia do Riacho da Cachoeira, na Bahia, utilizando um artigo selecionado na revisão da literatura para analisar a aplicação do Hidrograma Unitário. Os resultados obtidos evidenciaram a eficácia do Hidrograma Unitário na estimativa de vazões e ressaltaram a necessidade de mais investigações que explorem sua aplicabilidade em diferentes contextos geográficos e hidrológicos. A pesquisa enriquece o conhecimento científico na área, fomentando discussões sobre a eficácia e os desafios relacionados ao uso do Hidrograma Unitário. Dessa forma, o trabalho se destaca como uma contribuição significativa para a engenharia civil, especialmente no que se refere à segurança e à qualidade de vida das populações em áreas vulneráveis a fenômenos hidrológicos.

Palavras-chave: Hidrograma Unitário. Estimativa de Vazões. Estudo de Caso.

ABSTRACT

This work aims to analyze the applicability of the Unit Hydrograph method in estimating design flows in river basins. The research was conducted using a mixed approach, integrating qualitative and quantitative methods. In the first phase, a systematic literature review was carried out in order to identify the main approaches, advantages and limitations of the Unit Hydrograph. This review was based on high-quality sources and used specific keywords to enhance the results. In the second phase, a case study was conducted in the Cachoeira Creek Basin, using an article selected in the literature review to analyze the application of the Unit Hydrograph. The results showed the effectiveness of the Unit Hydrograph in estimating flows and highlighted the need for further research to explore its applicability in different geographical and hydrological contexts. The research enriches scientific knowledge in the area, fostering discussions on the effectiveness and challenges related to the use of the Unit Hydrogram. In this way, the work stands out as a significant contribution to civil engineering, especially with regard to the safety and quality of life of populations in areas vulnerable to hydrological phenomena.

Keywords: Unit hydrograph. Flow Estimation. Case study.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Elementos do trabalho acadêmico
- Figura 2 - O Método do Hidrograma unitário
- Figura 3 - Hidrograma unitário
- Figura 4 - Exemplo de hidrograma para evento de precipitação
- Figura 5 - Principais modelos de HU
- Figura 6 - Bacia Hidrográfica do Riacho da Cachoeira
- Figura 7 - Hidrograma unitário triangular do SCS.
- Figura 8- Hidrograma unitário da Bacia do Riacho da Cachoeira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	DESENVOLVIMENTO	17
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1.1	O Escoamento Superficial	17
2.1.2	Inundações Urbanas	18
2.1.3	Hidrograma Unitário.....	19
2.1.4	Aplicações Práticas dos Processos do Hidrograma Unitário	23
2.1.5	Exemplos de Aplicação do HU.....	24
3	METODOLOGIA	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DA CACHOEIRA	29
4.2	APLICAÇÃO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO	30
4.3	ANÁLISE DE APLICAÇÃO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO.....	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
6	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de obras de engenharia civil sujeitas à ação das águas, como barragens, canais e pontes, depende da estimativa precisa das vazões de projeto a serem adotadas, referentes às contribuições das bacias hidrográficas em que se localizam. A estimativa inadequada ou incorreta dessas vazões pode resultar na construção de obras subdimensionadas e ocasionar falhas estruturais que levarão a sérias consequências, como inundações, prejuízos materiais, calamidades, ferimentos ou até morte de animais e de pessoas.

Uma das ferramentas eficazes para a estimativa de vazões de projeto em bacias hidrográficas é o método do hidrograma unitário (HU). Através da análise da resposta da bacia a eventos de chuva, aplicações do HU possibilitam a estimativa da vazão máxima que poderá escoar pela bacia em um determinado período de tempo.

O método do HU foi apresentado primeiramente por Sherman em 1932, ao observar, na análise de muitos eventos, certa regularidade nos hidrogramas de cheias, traduziu, através de equações empíricas, o comportamento do escoamento superficial resultante de determinada chuva. Posteriormente, o método foi aperfeiçoado por diversos outros autores, porém mantendo a ideia fundamental de se estabelecer relações entre os parâmetros do hidrograma e as características das bacias hidrográficas. Na oportunidade Sherman afirmou que: "O hidrograma unitário é a resposta da vazão de uma bacia à precipitação unitária, aplicada instantaneamente e uniformemente sobre a área da bacia."

Assim, apesar da importância crítica na gestão de recursos hídricos e no planejamento de obras de engenharia civil, o método do Hidrograma Unitário ainda é subutilizado em muitas regiões devido ao conhecimento limitado sobre sua aplicação e eficácia. Este estudo visa investigar como a falta de conhecimento e compreensão técnica sobre o método do Hidrograma Unitário impacta a precisão de estimativas de vazões de projeto em bacias hidrográficas. Sendo assim, o presente estudo busca identificar as barreiras para a adoção deste método e propor soluções para aumentar sua aplicação prática entre os profissionais da engenharia civil.

Visando abordar a problemática da falta de conhecimento e divulgação da utilização do método do Hidrograma Unitário, esse trabalho justifica-se por sua relevância social, principalmente no contexto da gestão sustentável dos recursos hídricos e do planejamento urbano. Além disso, a estimativa adequada de vazões de projeto influencia diretamente na segurança e na qualidade de vida das populações que habitam áreas suscetíveis a fenômenos hidrológicos, como enchentes, por exemplo. Salienta-se também a importância da contribuição

acadêmica, haja vista que o método do Hidrograma Unitário, apesar de sua importância reconhecida, ainda carece de estudos aprofundados que explorem sua aplicabilidade em diferentes contextos geográficos e hidrológicos. Portanto, esta pesquisa bibliográfica poderá contribuir para o enriquecimento do conhecimento científico na área, colaborando com discussões sobre a eficácia e os desafios associados à utilização do Hidrograma Unitário na estimativa de vazões de projeto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a aplicação do método do hidrograma unitário na estimativa de vazões de projeto em uma bacia hidrográfica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre as principais abordagens, vantagens e limitações do método do hidrograma unitário;
- Examinar os resultados obtidos em estudos acadêmicos selecionados, aplicando critérios definidos para a análise da estimativa de vazões com base no método do hidrograma unitário.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão inseridos os principais conceitos teóricos, necessários para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso. Na abordagem apresentada serão desenvolvidos tópicos sobre o escoamento superficial, as inundações urbanas, generalidades sobre o Hidrograma Unitário e resultados de aplicações práticas de metodologias do HU. Os desdobramentos desses tópicos são sistematizados nas seções a seguir.

2.1.1 O Escoamento Superficial

O escoamento superficial refere-se ao movimento da água da chuva sobre a superfície do solo, quando esta não é absorvida pela infiltração. Conforme descrito por Targa (2012), em áreas onde a cobertura do solo é predominantemente impermeável, como em zonas urbanas, a infiltração é significativamente reduzida, resultando em um aumento do escoamento superficial. Esse fenômeno é influenciado por vários fatores, incluindo o uso e a cobertura do solo, a declividade do terreno e a forma da bacia hidrográfica.

A expansão urbana em escala global frequentemente ocorre de maneira desordenada, priorizando os interesses econômicos e sociais dos seres humanos em detrimento da organização ambiental. Um dos impactos imediatos desse crescimento é a diminuição da infiltração das águas pluviais no solo, o que resulta em um aumento significativo do escoamento superficial. Estudos recentes, como os mencionados por Terra (2021), destacam esse aumento considerável no volume e na intensidade do escoamento superficial em áreas urbanas e periurbanas.

Esse aumento no escoamento superficial acarreta consequências graves, especialmente no que se refere às inundações urbanas. Projetam-se essas inundações como um dos principais desastres naturais, ocasionando não apenas perdas econômicas, mas também perdas de vidas humanas, como observado por Caseri et al. (2016). As inundações urbanas frequentemente resultam em sérios prejuízos econômicos e sociais, além da destruição da infraestrutura urbana. Isso inclui danos materiais, perda de vidas, aumento da propagação de doenças transmitidas pela água e interrupção de serviços públicos essenciais, como fornecimento de energia elétrica e água, e bloqueio das vias de transporte (Terra, 2021).

2.1.2 Inundações Urbanas

As inundações são desastres responsáveis pelo ceifamento de vidas e infinitas perdas materiais. Nesse sentido, Terra (2021) destaca:

“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)”. (Terra, 2021, p.10).

Quanto à causalidade, as inundações podem ser resultantes de diversos fatores combinados entre si, conforme descrito por Tucci e Bertoni (2003):

- **Precipitação Intensa:** Chuvas intensas, especialmente do tipo convectivo e orográfico, podem resultar em grandes volumes de água em curtos períodos, levando a inundações (Tucci & Bertoni, 2003, p.62).
- **Impermeabilização do Solo:** A urbanização e a impermeabilização do solo nas áreas urbanas reduzem a capacidade de absorção da água, aumentando o escoamento superficial e o risco de inundações (Tucci & Bertoni, 2003, pp.33-52).
- **Alterações na Drenagem Natural:** A canalização de rios, riachos e galerias pluviais, juntamente com obstruções ao escoamento, como aterros e pontes, podem contribuir para inundações urbanas (Tucci & Bertoni, 2003, pp.33-52).
- **Desmatamento e Uso do Solo:** A perda de cobertura vegetal, seja por desmatamento, reflorestamento ou uso agrícola, pode aumentar a frequência de inundações devido à falta de interceptação da precipitação e ao assoreamento dos rios (Tucci & Bertoni, 2003, p.62).
- **Topografia e Declividade:** Em áreas com topografia acidentada, as áreas planas e mais baixas, propícias à ocupação, apresentam alto risco de inundações devido à redução da declividade e ao aumento da incidência de áreas planas (Tucci & Bertoni, 2003, p.62).

Esses são alguns dos principais fatores que podem contribuir para a ocorrência de inundações urbanas e ribeirinhas na América do Sul. Contudo, algumas medidas preventivas e de gestão podem ser adotadas, como o planejamento urbano adequado, preservação da cobertura vegetal e desenvolvimento sustentável (Tucci & Bertoni, 2003; Terra, 2021).

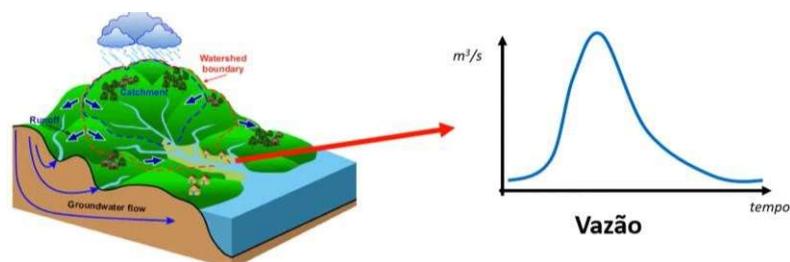
Ademais, a quantificação das variáveis hidrológicas como parte fundamental para o entendimento e a gestão dos eventos de inundação. (Tucci, Hespanhol & Cordeiro Netto, 2001; Terra, 2021). Nessa direção, surgiu a Hidrologia Estatística que teve sua origem no século XX, com o desenvolvimento de técnicas estatísticas para lidar com a variabilidade e incerteza dos dados hidrológicos (Terra, 2021).

Uma das representações matemáticas mais comumente utilizadas para modelar processos de precipitação e escoamento superficial é o hidrograma unitário. A determinação de um hidrograma unitário depende dos dados observados de precipitação e vazão equivalentes ao tempo de concentração da bacia. As séries históricas de precipitação são mais comuns em comparação com a disponibilidade de dados de vazão, especialmente em áreas urbanas. Mesmo que não haja dados faltantes, muitas vezes ocorrem alterações no uso dos solos lindeiros aos corpos d'água, o que torna o conjunto de dados não estático (Terra, 2021).

2.1.3 Hidrograma Unitário

O hidrograma, como ilustrado na Figura 2.1, é o gráfico que relaciona a vazão com o tempo. Ele é resultado de vários processos que aconteceram na bacia hidrográfica, desde a geração do escoamento até os processos de sua propagação ao longo de diferentes trajetórias ou caminhos possíveis, na superfície do solo, através de infiltrações nele e ao longo da rede de drenagem (Rodrigo Paiva, 2020).

Figura 1 - O Hidrograma



Fonte: Rodrigo Paiva (2020)

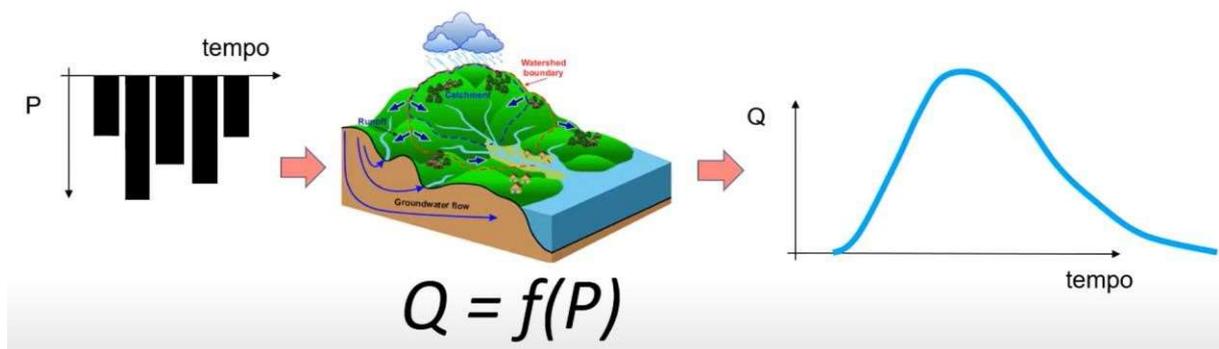
De acordo com Innocente e Chaffe (2017), os estudos de Sherman (1932) representaram um avanço significativo na determinação de hidrogramas. De acordo com Sherman (1932) apud Rodrigo Paiva (2020): “conhecendo um hidrograma em resposta de uma precipitação unitária,

é possível computar o hidrograma correspondente à precipitação de diferentes durações e intensidades”.

Ainda segundo Innocente e Chaffe (2017), Sherman considerou que a bacia responde linearmente a uma unidade de precipitação efetiva, uniforme no tempo e no espaço. Sendo assim, a resposta a essa precipitação foi chamada hidrograma unitário (HU). Por conseguinte, o HU é uma função de transferência entre a precipitação efetiva e o escoamento superficial (Innocente & Chaffe, 2017).

Sendo assim, o Método do Hidrograma Unitário utiliza uma função de transferência que transforma a Precipitação Efetiva que ocorre em uma bacia hidrográfica em Vazão no exutório dessa mesma bacia e, essa função de transferência é chamada de Hidrograma Unitário. Conforme o esquema representado na Figura 2.2.

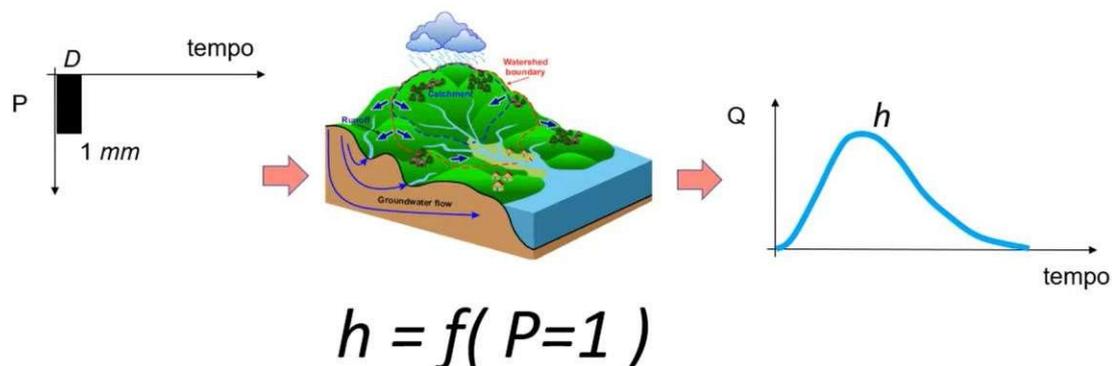
Figura 2 - O Método do Hidrograma unitário.



Fonte: Rodrigo Paiva (2020)

A partir desse pressuposto, pode-se definir o Hidrograma Unitário (HU) como sendo o hidrograma de escoamento direto resultante de uma precipitação efetiva unitária, ocorrida durante uma duração pré-definida. A Figura 2.3 ilustra o processo precipitação/vazão/hidrograma.

Figura 3 - Hidrograma unitário



Fonte: Rodrigo Paiva (2020)

Em síntese, de acordo com Terra (2021), um hidrograma unitário é descrito como um hidrograma de cheia produzido por uma chuva efetiva unitária e uniforme com uma duração específica. Ele representa a resposta da bacia hidrográfica a uma precipitação de intensidade constante e duração específica, onde o volume do hidrograma unitário é igual ao volume da precipitação efetiva que caiu uniformemente sobre a bacia hidrográfica.

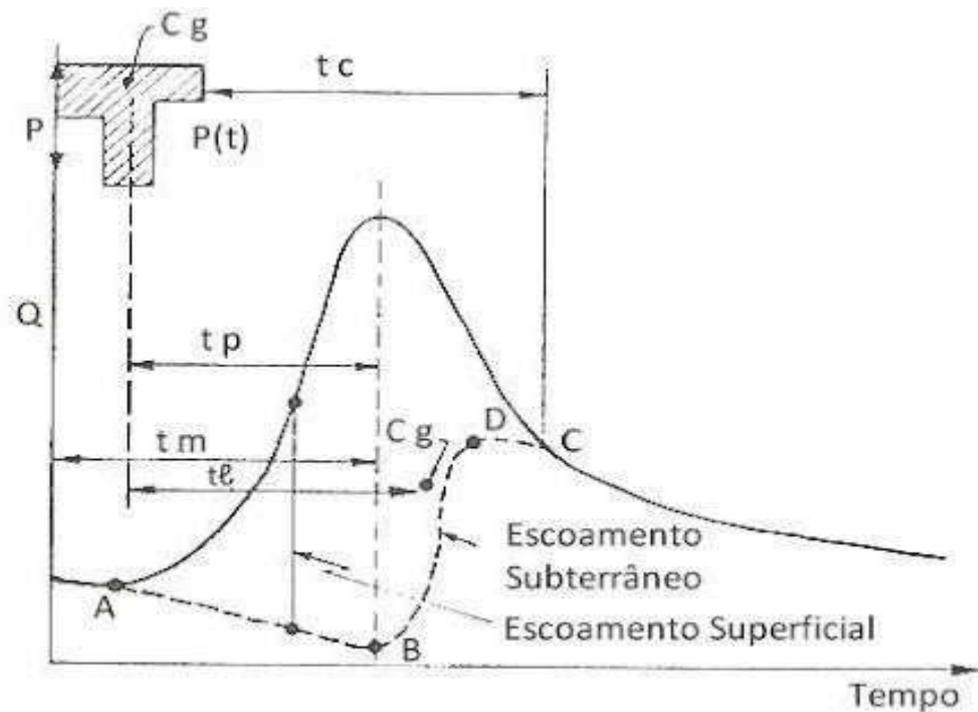
Nesse sentido, Andrade (2007) afirma que:

“O método do Hidrograma unitário (HU) tornou-se uma ferramenta disponível e de fácil utilização para a transformação da chuva em vazão. Sua versatilidade encontra-se em suposições simplificadas de que a bacia hidrográfica comporta-se como um sistema linear e não varia no tempo, permitindo-se então, a avaliação de uma resposta constante. A função matemática mais acessível é a que resulta de uma chuva na forma de impulso unitário conhecido como (HUI)”. (Andrade, (2007), p.8).

Vale destacar que esse método é muito conhecido, por ser prático e simples, pois por meio de hipóteses simplifica os cálculos relacionados à propagação do escoamento em uma bacia hidrográfica (Rodrigo Paiva, 2020).

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 exutório. Na Figura 2.4 é apresentado um hidrograma após um evento de precipitação.

Figura 4 - Exemplo de hidrograma para evento de precipitação



Fonte: Tucci (2004)

Após ocorrida a precipitação, há um intervalo de tempo em que a curva do escoamento superficial se eleva, este intervalo pode ser caracterizado pelos fenômenos de interceptação e perdas iniciais. Após estas perdas, a vazão aumenta gradativamente no tempo (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, quando observa-se 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 (ex., rios), já o subterrâneo se manifesta no meio poroso (ex., aquíferos granulares com

porosidade primária), portanto, o seu gradiente de velocidade é menor. O escoamento subterrâneo se iguala ao escoamento superficial no tem (t_c) e 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_l) é o intervalo entre o centro de massa da precipitação até o centro de gravidade do hidrograma (Tucci, 2001).

2.1.4 Aplicações Práticas dos Processos do Hidrograma Unitário

Sobre a aplicação de processos do HU, Carvalho & Chaudhry, (2001), partiram do pressuposto, construído por eles, de que “o conceito do hidrograma unitário tornou-se largamente aceito como uma das mais notáveis ferramentas para a hidrologia”, como justificado no texto a seguir:

“Sua versatilidade encontra-se nas suposições simplificadoras de que a bacia hidrográfica comporta-se como um sistema linear e invariante no tempo, permitindo assim, a avaliação de uma resposta. A função de resposta matematicamente mais acessível é aquela resultante de chuva em forma de impulso unitário chamada de Hidrograma Unitário Instantâneo – HUI”. (Carvalho & Chaudhry, 2001, p.5).

Segundo Carvalho & Chaudhry (2001), vários modelos conceituais têm sido propostos para representar o HUI, que tem como falha a imposição da estrutura interna da bacia, sem levar em consideração a estrutura geomorfológica. Foi nesse aspecto que Rodriguez-Ihu-be e Valdés (1979), citados por Carvalho & Chaudhry, (2001), inovaram quando relacionaram a resposta hidrológica da bacia às suas qualidades geomorfológicas. Como ponderado em Carvalho & Chaudhry (2001, p. 05), “a metodologia geomorfológica possui potencial para ser utilizada em bacias sem registros de dados, especialmente no Brasil, cuja extensão territorial inviabiliza os programas convencionais de observação hidrológica”.

Tomando como base os estudos e princípios enunciados acima, Carvalho & Chaudhry (2001), desenvolveram um estudo cujo principal resultado apontado foi a eficácia do modelo do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG) na previsão de respostas hidrológicas em bacias hidrográficas. Os pesquisadores testaram o modelo em duas bacias do Estado de São Paulo, utilizando mapas topográficos detalhados para ajustar os parâmetros do modelo.

Ao comparar os resultados obtidos da aplicação do modelo com dados reais de vazão dos rios considerados, os pesquisadores acima citados, verificaram que o modelo produziu bons resultados. Isso significa que o HUIG foi capaz de prever com precisão como a bacia hidrográfica responderia a eventos de chuva, demonstrando a utilidade e eficácia da abordagem geomorfológica na previsão de processos hidrológicos.

Portanto, dos estudos divulgados em Carvalho & Chaudhry, (2001), pôde-se concluir que o modelo do HUIG pode ser considerado como uma ferramenta eficaz para prever vazões e ajudar a entender como a água se desloca em uma bacia hidrográfica, o que é fundamental para o planejamento urbano, a gestão de recursos hídricos e a prevenção de desastres naturais relacionados à água.

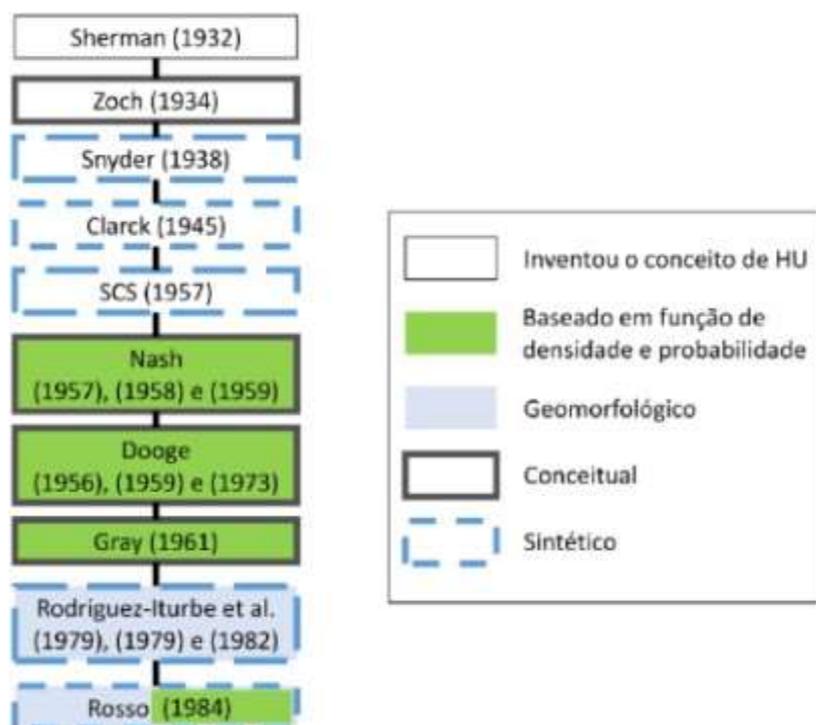
2.1.5 Exemplos de Aplicação do HU

Bhunya et al. (2011) categorizaram os hidrogramas unitários em três tipos distintos:

- i) sintéticos;
- ii) conceituais;
- iii) geomorfológicos.

Com base nessa classificação, Innocente (2016) desenvolveu um esquema, ilustrado na Figura 2.5, que mostra a evolução histórica dos hidrogramas unitários, juntamente com seus respectivos autores.

Figura 5 - Principais modelos de HU



Fonte: Innocente (2016).

Os modelos são sintetizados da seguinte forma (Terra, 2021):

- **Modelo de Zoch (1934):** Propõe que o comportamento da bacia hidrográfica é semelhante ao de um reservatório, com o escoamento superficial decaindo exponencialmente.
- **Modelo de Snyder (1938):** Baseado na premissa de que o escoamento é totalmente dependente das características físicas da bacia hidrográfica.
- **Modelo de Clark (1945):** Divide a bacia hidrográfica em frações de área e atribui a cada fração a responsabilidade pelo escoamento superficial em um determinado intervalo de tempo.
- **Modelo de Dooge (1956) e Gray (1961):** Fundamentado nas premissas do modelo de Nash (1957), que considera a bacia hidrográfica como um sistema linear com

"n" reservatórios em sequência, onde a transferência do escoamento é regida por uma taxa "k". Os parâmetros do modelo são calibrados por séries de dados.

- **Modelo de Rodriguez-Iiturbe et al (1979):** Propõe um modelo onde uma partícula de água segue um caminho predefinido dentro da bacia hidrográfica, associando o hidrograma unitário à geomorfologia da bacia e ao rio de maior ordem.
- **Modelo de Rosso (1984):** Combina as teorias de Nash (1957) e de Rodriguez-Iiturbe et al (1979) para propor um modelo que considera a resposta hidrológica da bacia em relação à sua geomorfologia e à rede de drenagem.

Terra (2021) realizou um estudo na bacia do Rio Santana, no Estado do Rio Grande do Sul, utilizou o hidrograma unitário de Nash para determinar vazões de pico e tempo de pico. Os resultados obtidos demonstraram uma forte correlação entre os parâmetros do hidrograma unitário e as variáveis hidrológicas analisadas, indicando a viabilidade do uso desse método na área de estudo .

Através desse estudo de Terra (2021), foi possível caracterizar os eventos intensos de precipitação que frequentemente resultam em inundações na região. A aplicação do hidrograma unitário permitiu estimar as vazões resultantes desses eventos, contribuiu para uma melhor compreensão do comportamento hidrológico da bacia e forneceu subsídios para o planejamento e gestão dos recursos hídricos na região estudada.

3 METODOLOGIA

O estudo utilizou uma abordagem mista, qualitativa e quantitativa, organizada em duas etapas principais: a revisão bibliográfica sobre o método do hidrograma unitário e o estudo de caso da aplicação prática do método em uma bacia hidrográfica específica.

Na primeira etapa, de caráter qualitativo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura para identificar as principais abordagens, vantagens, limitações e contextos de aplicação do método do hidrograma unitário. As fontes de pesquisa foram realizadas no *Portal de Periódicos da CAPES*, garantindo a consulta a materiais relevantes e de alta qualidade. As palavras-chave utilizadas foram: “hidrograma unitário” e “Vazões”, combinadas com operadores booleanos para refinar os resultados.

Os critérios de seleção foram definidos como:

Critérios de Inclusão:

- Estudos que abordassem diretamente o método do hidrograma unitário e sua aplicação na estimativa de vazões de projeto;
- Artigos publicados nos últimos 5 anos (2019-2024).

Critérios de Exclusão:

- Estudos duplicados ou redundantes;
- Publicações sem relação direta com o tema ou que não fornecessem dados aplicáveis ao contexto da pesquisa;
- Estudos em língua estrangeira.

Foram encontrados dois trabalhos, um de 2009 e outro de 2019. Na segunda etapa, de caráter quantitativo, após a leitura inicial do título e do resumo, apenas um trabalho foi selecionado, conforme os princípios do PRISMA. O trabalho escolhido teve como objetivo a aplicação do método do hidrograma unitário na estimativa de vazões. Seus resultados e discussões serão apresentados na próxima seção.

Essa metodologia mista possibilitou atender aos objetivos do estudo, integrando a análise teórica com a aplicação prática, e forneceu subsídios robustos para avaliar a aplicabilidade do hidrograma unitário em hidrologia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Retomando os objetivos deste estudo, que visam avaliar a eficácia do método do hidrograma unitário na estimativa de vazões de projeto, a pesquisa de Coutinho et al. (2019) se alinha ao objetivo geral de aplicar esse método para transformar a precipitação de projeto em vazão, focando na determinação da vazão máxima provável da bacia do Riacho Cachoeira. O trabalho, ao empregar diferentes métodos de desagregação de chuvas, busca estimar as vazões associadas a períodos de retorno específicos (2, 10, 25, 50 e 100 anos), permitindo uma análise mais robusta das variabilidades hidrológicas.

O estudo também se propôs a avaliar a aplicabilidade e a eficácia do hidrograma unitário sintético do Soil Conservation Service (SCS), um dos modelos mais usados para a previsão de vazões, na modelagem de hidrogramas para uma bacia hidrográfica rural localizada no semiárido nordestino. Essa abordagem se destaca pela sua capacidade de lidar com as particularidades climáticas e geográficas dessa região, proporcionando uma análise relevante para os objetivos deste trabalho, que envolvem a investigação das vantagens e limitações do método do hidrograma unitário.

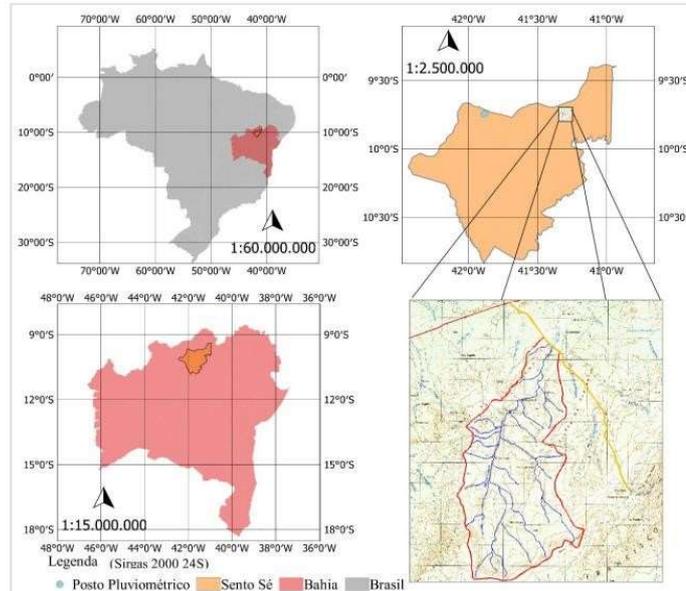
4.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DA CACHOEIRA

A bacia do Riacho da Cachoeira (Figura 6) foi escolhida para o estudo de Coutinho et al. (2019) devido à sua relevância na estimativa da vazão máxima, crucial para o dimensionamento de infraestruturas, e por ser um curso d'água intermitente que escoar apenas nas estações chuvosas, afetando a conectividade com uma importante estrada municipal. A pesquisa também visa avaliar o impacto das metodologias de desagregação de chuva no hidrograma de projeto, uma abordagem pouco explorada no semiárido nordestino.

Conforme descrito por Coutinho et al. (2019), a bacia tem uma área de 171,17 km², com comprimento de 27,557 km e altitudes variando entre 428,00 metros (jusante) e 820,00 metros (na cabeça da bacia), resultando em uma declividade média de 0,01423 m/m. O tempo de concentração foi estimado em 263,59 minutos. A área é predominantemente coberta pela vegetação típica da Caatinga, o que influencia as características hidrológicas e a dinâmica do escoamento superficial. Os dados pluviométricos utilizados foram obtidos a partir de séries históricas de várias estações na região, com destaque para o posto de Sento Sé, que, com 54 anos de dados, foi considerado o mais representativo para a bacia. Esses dados são essenciais para determinar a precipitação de projeto e analisar a vazão máxima associada a diferentes

períodos de recorrência.

Figura 6 - Bacia Hidrográfica do Riacho da Cachoeira

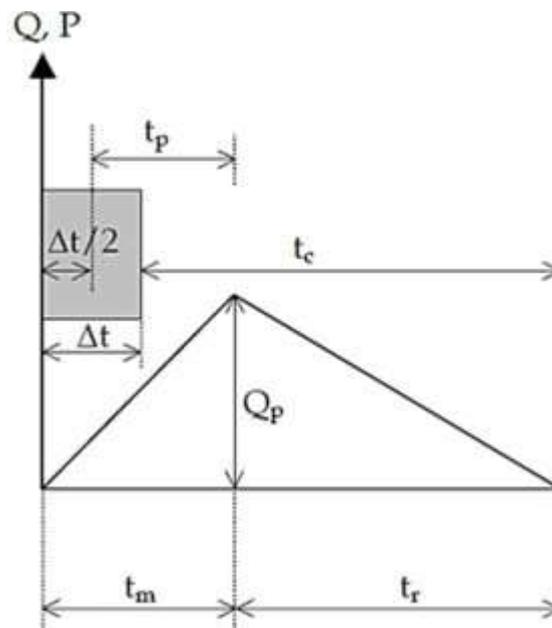


Coutinho et al (2019)

4.2 APLICAÇÃO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO

No trabalho de Coutinho et al (2019) para transformar a precipitação de projeto em vazão na bacia, inicialmente foi necessário aplicar um modelo de transformação chuva-vazão. “O método do hidrograma unitário (HU) representa a resposta da bacia a uma precipitação de volume unitário de duração D_t .” (Coutinho et al, 2019, p.152).

Figura 7 - Hidrograma unitário triangular do SCS.



Coutinho et al (2019)

Os parâmetros do hidrograma unitário triangular do SCS são determinados da seguinte forma:

1. Determinar o tempo de concentração (t_c) da bacia.
2. Determinar o parâmetro t_m :

$$t_m = \frac{\Delta t}{2} + 0,6 \cdot t_c$$

Onde Δt é o intervalo de tempo de simulação, obtido a partir da precipitação, e t_c é o tempo de concentração da bacia.

3. Determinar o tempo de pico do hidrograma, t_p :

$$t_p = 0,6 \cdot t_c$$

4. Determinar o tempo de recessão do hidrograma, t_r :

$$t_r = 1,67 \cdot t_p$$

5. Determinar o tempo de base do hidrograma, t_b :

$$t_b = t_m + t_r$$

1. Determinar a vazão máxima utilizando a equação abaixo:

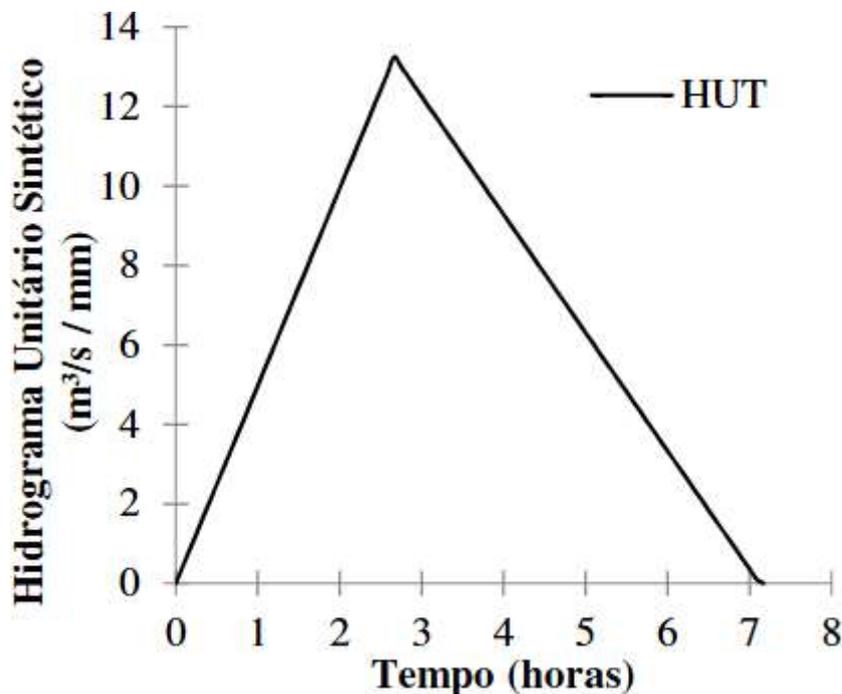
$$Q_p = \frac{0,208 \cdot A}{t} \quad Q_p = \frac{0,208 \cdot A}{t}$$

Onde Q_p é a vazão máxima do hidrograma triangular ($m^3/s/mm$) e A é a área da bacia (km^2).

O intervalo de tempo é definido em unidades de t_p . Recomenda-se a utilização de $\Delta t = t_p/5$. Para cada intervalo de tempo, multiplica-se a precipitação pelas ordenadas do HU. O hidrograma de projeto é obtido somando-se os hidrogramas individuais de cada intervalo de precipitação (Coutinho et al, 2019).

Nessa Direção, na Figura 8 é apresentado o hidrograma unitário da bacia do Riacho da Cachoeira. O hidrograma unitário apresentou uma vazão de pico de $13,3 m^3 \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}$, no tempo de 2,7 horas (Coutinho et al, 2019) .

Figura 8- Hidrograma unitário da Bacia do Riacho da Cachoeira



Coutinho et al (2019)

4.3 ANÁLISE DE APLICAÇÃO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO

Tendo em vista os resultados obtidos no estudo de Coutinho et al (2019), vale destacar que:

Comumente utilizado para determinação de hidrograma de projeto, o hidrograma unitário sintético do SCS é um modelo chuva- vazão bastante utilizado por se basear em características fisiográficas da bacia de fácil determinação. Para Carvalho & Chaudrhy (2001), a facilidade de aplicação do HU encontra-se nas suposições simplificadoras de que a bacia hidrográfica se comporta como um sistema linear e invariante no tempo. (Coutinho et al, 2019, p.147).

Nesse sentido, apesar de sua praticidade e aplicabilidade, o hidrograma unitário apresenta limitações significativas. Ele não considera certas características de maneira relevante, uma vez que o método do HU pressupõe um sistema linear e invariante no tempo. Sua aplicabilidade também é limitada em casos de bacias complexas, onde variações locais e mudanças no uso do solo podem alterar substancialmente a dinâmica do escoamento. Como demonstrado no estudo de Coutinho et al. (2019), é possível contornar essas limitações ao incorporar variantes estatísticas ao modelo. No entanto, isso reduz sua praticidade. Para obter melhores resultados, é fundamental utilizar o hidrograma unitário com cautela e, quando necessário, ajustá-lo com base nas condições locais específicas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficácia do método do hidrograma unitário na estimativa de vazões de projeto, com foco na bacia do Riacho da Cachoeira, localizada no semiárido nordestino. Os resultados indicaram que a aplicação do hidrograma unitário, particularmente o método do Soil Conservation Service (SCS), foi eficaz na transformação da precipitação de projeto em vazão, permitindo uma estimativa precisa das vazões máximas para diferentes períodos de retorno. A utilização de dados pluviométricos históricos, combinada com métodos de desagregação de chuvas e a construção de hietogramas de projeto, proporcionou uma análise detalhada do escoamento na bacia estudada.

O estudo também ressaltou a importância de considerar as particularidades climáticas e geográficas da região semiárida ao aplicar modelos de hidrograma unitário. A vegetação típica da Caatinga e as características do solo influenciam significativamente as respostas hidrológicas da bacia, o que reforça a necessidade de adaptação dos modelos às condições locais. Nesse contexto, a aplicação do modelo SCS mostrou-se robusta, sendo particularmente adequada para regiões de clima intermitente, como o semiárido, que apresentam desafios específicos para modelagens hidrológicas.

Apesar de sua praticidade e aplicabilidade, o hidrograma unitário apresenta limitações importantes. Ele pressupõe um sistema linear e invariante no tempo, o que não contempla características relevantes de bacias complexas, como variações locais e mudanças no uso do solo, que podem alterar substancialmente a dinâmica do escoamento. Como demonstrado no estudo de Coutinho et al. (2019), essas limitações podem ser mitigadas pela incorporação de variantes estatísticas ao modelo. No entanto, tal abordagem reduz a praticidade do método. Assim, é essencial utilizar o hidrograma unitário com cautela, ajustando-o sempre que necessário às condições específicas da bacia analisada.

Por fim, o baixo número de estudos relacionados ao tema resalta a necessidade de futuras pesquisas que explorem novas metodologias de desagregação de chuvas e sua aplicação em diferentes bacias hidrográficas. Além disso, recomenda-se a integração do método do hidrograma unitário com sistemas de monitoramento contínuo de dados hidrológicos, visando ao aprimoramento das estimativas de vazões de projeto. A capacitação de profissionais da área também é fundamental para garantir a correta aplicação de métodos hidrológicos em projetos de engenharia hídrica, contribuindo para soluções mais eficazes e adaptadas às necessidades locais.

6 REFERÊNCIAS

ANDRADE, A.C. de S. **Determinação de hidrogramas unitários geomorfológicos na Bacia do Ribeirão Salobra**. Orientador: Jorge Luiz Steffen. 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Canoí Grande, 2007

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.

CARVALHO, Mirléia Aparecida de; CHAUDHRY, Fazal Hussain. Aplicação de hidrograma unitário geomorfológico na previsão de respostas hidrológicas. **RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 5-17, 2001.

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.

GAROTTI, L. M.; BARBASSA, A. P. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Carlos, SP, v.15, n.1, p.19-28, jan, 2010.

COUTINHO, Artur Paiva et al. O efeito do método de desagregação de chuva no hidrograma de projeto para uma bacia hidrográfica rural no semiárido nordestino. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 146-156, 2019.

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.

INNOCENTE, Camyla; CHAFFE, Pedro Luiz Borges. Uma revisão preliminar sobre a aplicação do hidrograma unitário na pesquisa, no ensino e na engenharia. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017.

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.

MORAES, Antonio Carlos Robert. **Meio ambiente e ciências humanas**. 4. ed. São Paulo: Annablume, 2005.

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.

RODRIGO PAIVA. **Hidrograma Unitário 1** - Processos de Propagação e Formação do Hidrograma. Rodrigo Paiva, 2020. 1 vídeo (16:46 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=tshEUfZQjs4>. Acesso em: 7 mai. 2024.

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

TARGA, Marcelo dos Santos et al. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, p. 120-142, 2012.

TERRA, Thiago Augusto et al. Análise do processo chuva-vazão utilizando o hidrograma unitário conceitual de Nash na bacia hidrográfica do rio Santana. 2021.

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

TUCCI, Carlos EM; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul**. 1. ed. São Paulo: ABRH, 2003.

TUCCI, Carlos EM; HESPANHOL, Ivanildo; CORDEIRO NETTO, Oscar de M. **Gestão da água no Brasil**. 2001.



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
GABINETE DO REITOR

Av. Universitária, 1069 • Setor Universitário
Caixa Postal 86 • CEP 74605-010
Goiânia • Goiás • Brasil
Fone: (62) 3946.1000
www.pucgoias.edu.br • reitoria@pucgoias.edu.br

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante **PEDRO SIMÕES FERREIRA MIRANDA DE ANDRADE** do Curso de Engenharia Civil matrícula 2019.1.0025.0093-0, telefone: 62 98313-5895 e-mail pedrosimoesandrade@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **APLICABILIDADE DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO NA ESTIMATIVA DE VAZÕES DE PROJETO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS**, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 19 de dezembro de 2024.

Assinatura do autor:

Nome completo do autor: Pedro Simões Ferreira Miranda de Andrade

Assinatura do professor-orientador:

Nome completo do professor-orientador: Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos