

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOHN HEBERT DA SILVA ALMEIDA

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÕES
CAUSADAS PELO RIO CAÉM NO PERÍMETRO URBANO
DO MUNICÍPIO DE CAÉM - BA**

CRUZ DAS ALMAS – BA

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOHN HEBERT DA SILVA ALMEIDA

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÕES
CAUSADAS PELO RIO CAÉM NO PERÍMETRO URBANO
DO MUNICÍPIO DE CAÉM - BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como parte dos requisitos para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof. Dra. Andrea Sousa Fontes.

CRUZ DAS ALMAS – BA

2021

UFRB / Biblioteca Central da UFRB

Almeida, John Hebert da Silva

Identificação de áreas suscetíveis a inundações causadas pelo rio Caém no perímetro urbano do município de Caém - BA / John Hebert da Silva Almeida - Cruz das Almas, 2021.

68 f.: il. color; 30 cm.

Orientadora: Prof. Dra. Andrea Sousa Fontes.

TCC (Curso de Graduação em Engenharia Civil) UFRB / Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

1. Inundações. 2. Precipitações extremas. 3. Urbanização. 4. Vazões máximas. I. Fontes, Andrea Sousa.

CDU: 624.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOHN HEBERT DA SILVA ALMEIDA

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÕES CAUSADAS PELO
RIO CAÉM NO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE CAÉM - BA**

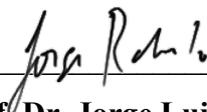
Data: 31/05/2021

Banca Examinadora:



Prof. Dra. Andrea Sousa Fontes

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB



Prof. Dr. Jorge Luiz Rabelo

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB



Me. Luan Marcos da Silva Vieira

Universidade Federal da Bahia - UFBA

CRUZ DAS ALMAS – BA

2021

Dedico aos meus pais, que sempre me apoiaram
e acreditaram nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por sempre ter me amparado nos momentos da minha jornada até hoje.

Aos meus pais e meu irmão por sempre estarem ao meu lado, me incentivando pela busca ao conhecimento, minha independência e meus sonhos. Sempre me apoiando e garantindo que o necessário não me falte. Obrigado por todo o suporte. Amo vocês!

Aos meus amigos que contribuíram para esta minha conquista. Não só nos momentos de alegria e descontração, mas nos momentos de preocupação e tristeza, nos momentos que pensei que não fosse conseguir.

À minha orientadora Andrea por todo o apoio, paciência e compreensão no tempo despendido nas orientações deste trabalho. Muito obrigado!

À UFRB pela oportunidade e todos os colaboradores pelo trabalho e suporte.

Enfim, o meu carinho e gratidão a todos aqueles que incentivaram e contribuíram nessa minha jornada.

RESUMO

As inundações são fenômenos naturais que ocorrem com certa frequência nos leitos dos rios. Com o processo de urbanização em crescimento, até mesmo nas pequenas cidades como Caém, diversas residências foram construídas próximas aos rios que cortam as cidades, e com a falta de previsibilidade de eventos de chuva, esta condição acaba tornando a situação mais preocupante. Um evento extremo de chuva que ocorreu em 2019 causou diversos prejuízos para os moradores próximo ao rio Caém, deixando a população em alerta sobre o assunto. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo principal identificar áreas suscetíveis a inundações causadas pelo rio Caém no trecho urbano do município. O estudo teve a finalidade de identificar trechos marginais do rio em questão que podem ser atingidos e verificar as magnitudes das precipitações que podem originar estas inundações. A metodologia utilizada compreendeu pesquisa bibliográfica referente ao tema, levantamento e tratamento de dados hidrológicos e geoespaciais, e realização de simulações com o apoio de softwares. Foram encontrados nos resultados, lâminas d'água acima do leito menor com alturas de 0,39m, 1,90m, 2,57m e 3,13m para as precipitações com períodos de retorno de 2 anos, 5,1 anos, 10 anos e 20 anos, respectivamente. Concluiu-se que precipitações com períodos de retorno relativamente baixos já podem atingir a população que vive às margens do rio Caém, devido à proximidade que a urbanização se deu e tem avançado em relação ao leito menor, dessa forma, demonstra que a maioria dos habitantes dessas regiões vivem suscetíveis a serem atingidos por inundações causadas por eventos extremos de precipitações.

Palavras-chave: Inundações, precipitações extremas, urbanização, vazões máximas.

ABSTRACT

Floods are natural phenomena that occur often in rivers. With the growing urbanization process, even in small towns like Caém, several residences were built next to the rivers that cut through the cities, and linked to the lack of predictability of rain events, this condition creates a worrying situation. An extreme rain event that occurred in 2019 caused several losses to residents near Caém River, leaving the population in attention. Thus, the present work had as main objective to identify areas susceptible to floods caused by Caém River in the city's urban area. The study aimed to identify river banks that can be reached and to verify the precipitations magnitudes that can lead to these floods. The methodology included bibliographic research related to the theme, survey and treatment of hydrological and geospatial data, and simulations with software support. Water levels above the low flow channel with heights of 0.39m, 1.90m, 2.57m and 3.13m were found in the results for precipitations with recurrence intervals of 2 years, 5.1 years, 10 years and 20 years, respectively. It was concluded that precipitations with relatively low recurrence intervals can reach the population that lives near Caém River, due to the proximity that urbanization took place and has advanced in relation to the low flow channel, hence, it demonstrates that the majority of inhabitants living in these regions are susceptible to being hit by floods caused by extreme rainfall events.

Keywords: Floods, extreme rainfall, urbanization, maximum flows.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Amort.	Amortecimento
Def.	Defasagem
Dr.	Doutor
Dra.	Doutora
Me.	Mestre
Precip.	Precipitação
Prof	Professor(a)
TR	Período de retorno
Veloc.	Velocidade
AMC	Antecedent Moisture Condition
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CENAD	Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CN	Curve Number
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRA	Fator Reducional de Área
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEMA	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
K-S	Kolmogorov-Smirnov
MDE	Modelo Digital de Elevação
SCS	Soil Conservation Service
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Representação dos leitos menor e maior de um rio.....	17
Figura 02 – Representação da localização do município no estado da Bahia	22
Figura 03 - Mapa de solos da área de estudo.....	23
Figura 04 - Delimitação da bacia com os canais de drenagem.....	24
Figura 05 - Representação da altimetria da bacia de drenagem	24
Figura 06 – Perfil longitudinal do talvegue principal.....	25
Figura 07 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia.....	27
Figura 08 – Florestas densas nas regiões de maior declividade	27
Figura 09 – Pastagens nas regiões de menor declividade.....	27
Figura 10 - Representação do perfil transversal do rio.....	29
Figura 11 - Local onde foram coletadas as medidas das marcas deixadas pela inundação.....	29
Figura 12 - Trecho onde danos materiais foram causados pela inundação	29
Figura 13 - Características para definição de um hidrograma sintético	34
Figura 14 - Interface da software HEC-HMS na etapa de modelagem.....	39
Figura 15 - Representação da linha de tendência logarítmica para os períodos de retorno.....	44
Figura 16 - Hietograma da precipitação extrema de 2019.....	44
Figura 17 - Hietogramas das precipitações total e efetiva - TR 5,1 anos	46
Figura 18 - Hidrograma unitário sintético adimensional - TR 5,1 anos	46
Figura 19 - Hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos - TR 5,1 anos.....	47
Figura 20 - Hidrograma total após o processo de convolução - TR 5,1 anos.....	47
Figura 21 - Hietogramas das precipitações total e efetiva - TR 2 anos	48
Figura 22 - Hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos - TR 2 anos.....	48
Figura 23 - Hidrograma total após o processo de convolução - TR 2 anos.....	49
Figura 24 - Hietogramas das precipitações total e efetiva - TR 10 anos	49
Figura 25 - Hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos - TR 10 anos.....	50
Figura 26 - Hidrograma total após o processo de convolução - TR 10 anos.....	50
Figura 27 - Hietogramas das precipitações total e efetiva - TR 20 anos	51
Figura 28 - Hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos - TR 20 anos.....	51
Figura 29 - Hidrograma total após o processo de convolução - TR 20 anos.....	51
Figura 30 - Hidrogramas de entrada e saída	52

Figura 31 - Gráfico da velocidade do escoamento	52
Figura 32 - Valores máximos das vazões de entrada e saída.....	52
Figura 33 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 1 - TR 2 anos.....	55
Figura 34 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 2 - TR 2 anos.....	55
Figura 35 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 1 - TR 5,1 anos.....	56
Figura 36 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 2 - TR 5,1 anos.....	56
Figura 37 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 1 - TR 10 anos.....	57
Figura 38 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 2 - TR 10 anos.....	57
Figura 39 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 1 - TR 20 anos.....	58
Figura 40 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 2 - TR 20 anos.....	58
Figura 41 - Residências próximas ao leito menor do rio	59
Figura 42 - Plantações de banana inundadas pela cheia do rio	59
Figura 43 - Residências atingidas pela inundação	59
Figura 44 - Residências suscetíveis a inundações	59

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 01 - Características do uso e ocupação do solo na bacia	26
Quadro 02 - Estações pluviométricas	29
Quadro 03 - Grupos de solos e suas características	31
Quadro 04 - Valores de CN para diferentes tipos e ocupações de solo	32
Quadro 05 - Limites sazonais para as condições de umidade antecedente (AMC).....	33
Quadro 06 – Variável Reduzida e Períodos de Retorno – Método de Gumbel.....	36
Quadro 07 - Dados de entrada para simulação no software HEC-HMS	39
Quadro 08 - Valores de coeficientes de Manning para arroios e rios.....	39
Quadro 09 - Precipitações dos 5 dias antecedentes ao evento de 2019	45
Quadro 10 - Resultados das propagações de ondas de cheia - TR 2, 10 e 20 anos	53
Quadro 11 - Prováveis danos para as regiões suscetíveis a inundações	54
Tabela 01 - Precipitações com probabilidades de ocorrência e períodos de retorno	42
Tabela 02 - Características físicas da bacia	45
Tabela 03 - Variáveis do hidrograma adimensional	45
Tabela 04 - Precipitações com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos	47
Tabela 05 - Resultados do modelo para avaliação das áreas ribeirinhas	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Inundações	16
3.1.1 Inundações ribeirinhas	16
3.2 Estimativas de precipitações e vazões máximas.....	18
3.3 Propagação de ondas de cheia	19
3.3.1 HEC-HMS	20
3.4 Áreas suscetíveis a inundações.....	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1 Caracterização da área de estudo	22
4.1.1 Delimitação da bacia de drenagem.....	23
4.1.2 Caracterização da bacia de drenagem.....	25
4.2 Tratamento e análise de dados hidrológicos.....	29
4.2.1 Precipitações Máximas Diárias Anuais	29
4.3 Estimativas de vazões máximas	30
4.3.1 Evento de precipitação extrema de 2019	30
4.3.2 Eventos de precipitação com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos	35
4.4 Propagação de ondas de cheia	36
4.4.1 Onda de cheia do evento de 2019	38
4.4.2 Ondas de cheia para diferentes períodos de retorno	40
4.5 Identificação de áreas suscetíveis a inundações	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1 Avaliação de eventos extremos de chuva a partir da série histórica	42

5.2 Estimativa de vazões máximas	45
5.2.1 Evento de precipitação extrema de 2019	45
5.2.2 Vazões máximas para precipitações com períodos de retorno 2, 10 e 20 anos	47
5.3 Propagações de ondas de cheia para eventos extremos de chuva.....	52
5.4 Identificação de áreas suscetíveis a inundações	53
6. CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

Dos 667 desastres naturais relacionados a inundações registrados na Bahia, 84 ocorreram na bacia do Itapicuru (bacia em que rio Caém está inserido no alto trecho), no qual isso representa 12,6% dos eventos. Este é um valor considerável quando se trata de uma bacia hidrográfica que tem 80% do seu território no semiárido e parte considerável dos municípios estão inseridos no Polígono das Secas, aos quais na maior fração do ano sofre com a escassez hídrica (NOVAIS, 2020).

Diversos condicionamentos urbanos atuais próximos a leitos de rios podem ser justificados como resultado de um modelo de desenvolvimento antigo, em que, esses rios poderiam ser utilizados como forma de transporte, abastecimento e disposição de dejetos da população. A perpetuação desse comportamento durante anos acaba afetando o abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de águas pluviais e resíduos sólidos (TUCCI, 2005).

O início da ocupação do município de Caém se deu, no final do século XIX, por garimpeiros que transitavam pela região com destino às minas de ouro da cidade de Jacobina. Os primeiros estabeleceram-se nas margens do rio Prata, atualmente denominado rio Caém, com a construção de residências e uma igreja e, posteriormente, esse processo de povoamento foi acelerado com o deslocamento em massa de famílias de operários à procura de emprego na construção do ramal ferroviário que viria a ser implantado no povoado, tendo suas obras iniciadas em 1910 (IBGE, 2018).

No censo realizado em 1950, Caém tinha população de 6.651 habitantes, sendo 1.204 na zona urbana e 5.447 na zona rural. Já no último Censo realizado em 2010, a cidade tinha 10.368 habitantes, sendo 3.655 na zona urbana e 6.713 na zona rural (IBGE, 1950; 2010). Isso demonstra não somente um crescimento na população total, mas também na porcentagem de pessoas que passaram a viver na zona urbana, no qual em 1950, 18,10% da população residia na zona urbana e, em 2010, houve um salto para 35,25%.

Dessa forma, percebe-se que o processo de estabelecimento de moradias em regiões ribeirinhas se deu de forma não controlada e acelerada, se atrelado ao fato as taxas de crescimento urbano citadas anteriormente, contribuindo para a instalação das mesmas em locais suscetíveis a inundações.

Um evento extremo de chuva que ocorreu no ano de 2019, colocou os moradores locais em estado de alerta por conta dos prejuízos causados pelas inundações nas margens do rio

Caém. Estes prejuízos compreendem plantações destruídas, animais mortos, residências invadidas e muros destruídos. Dessa forma, fica evidente a necessidade de cautela com o estabelecimento de edificações nesses trechos.

De acordo com Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD (2020), apesar que não seja possível evitar a ocorrência de fenômenos naturais, como as precipitações extremas, pode-se por meio de medidas preventivas, minimizar as suas consequências para que não se tornem grandes catástrofes. Evitar um desastre natural é mais econômico do que reconstruir as zonas afetadas.

Neste contexto, o desenvolvimento deste trabalho se mostra essencial para que estudos e análises sejam realizados a fim de entender melhor o comportamento hidrológico na região, além disso, estimar as consequências das precipitações no local. O conhecimento prévio das áreas suscetíveis a inundações representa uma importante ferramenta para que, não somente a população, mas os órgãos públicos também possam estar cientes dos riscos associados. Dessa forma, soluções para os problemas poderão ser traçadas de forma adequada e compatível para que novos prejuízos não sejam causados aos habitantes.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- O presente trabalho teve como objetivo identificar áreas suscetíveis a inundações causadas pelo rio Caém no perímetro urbano do município de Caém - BA.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar e comparar eventos extremos de chuva a partir da série histórica com o evento extremo de chuva que causou inundações em 2019;
- Estimar a vazão máxima do rio em resposta ao evento de chuva de 2019;
- Estimar a vazão máxima do rio em resposta aos eventos de chuva com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos;
- Analisar a propagação de ondas de cheia referentes às vazões máximas estimadas no trecho do rio Caém no perímetro urbano.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Inundações

Segundo Botelho (2011), as inundações podem ser caracterizadas como um evento excepcional que ocorre quando o rio transborda de forma inesperada, sobretudo quando o seu ambiente natural foi modificado, o que ocorre nas áreas urbanas.

Em complemento ao autor anterior, Righi (2016) define o termo inundação como o extravasamento da água de um rio para a sua planície e acontece como um processo natural do regime hidrológico, tanto nos espaços urbanos quanto nos rurais. Com a ocorrência de eventos de grande precipitação, o nível da água na calha do rio é elevado e faz com que parte transborde para as áreas marginais.

A inundação é o tipo de desastre natural mais comum em todo o mundo e tem consequências que afetam a economia, o ambiente e a vida de milhares de pessoas. Além disso, as alterações climáticas e a elevação do nível do mar tem potencializado os eventos de inundação, principalmente nas regiões costeiras e ribeirinhas, porém, são carentes os estudos de projeções de inundações para os próximos anos, principalmente em escala local, com referenciais de localização de precisão e que possam nortear ações mitigadoras (ARAÚJO, 2020).

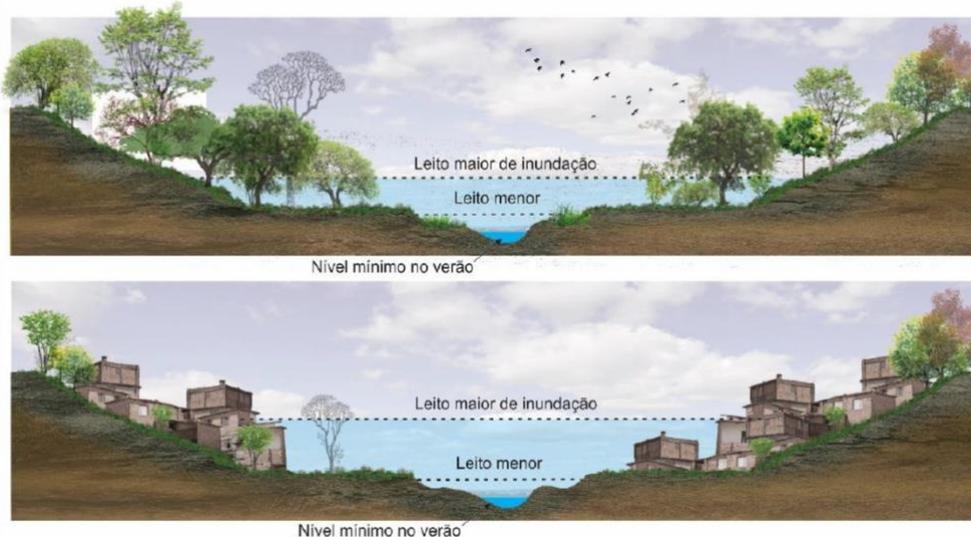
Segundo Peixoto *et al.* (2019), as inundações urbanas podem ser causadas pela impermeabilização do solo decorrente do processo de urbanização das cidades, e inundações ribeirinhas, quando ocorre a elevação do nível da água para o leito maior. As mesmas possuem comportamentos distintos, porém ambas devem ser abordadas tendo a bacia ou sub-bacia hidrográfica como unidade territorial de intervenção e planejamento.

Silva *et al.* (2017) concluíram em um estudo realizado na cidade de Boa Vista que, além das inundações serem causadas pela impermeabilização do solo e ocupações desordenadas de áreas ribeirinhas, há ainda a remoção da mata ciliar e o aumento do volume de resíduos sólidos jogados no leito do rio, como lixo gerado pelos moradores e esgoto não coletado adequadamente.

3.1.1 Inundações ribeirinhas

Ao analisar o comportamento hidrológico de um rio, ele geralmente pode ser dividido em leito menor e leito maior (Figura 01). O leito menor, que é a parte da calha onde a água escoar na maior parte do tempo, é delimitado ao fluxo gerado por eventos chuvosos com períodos de retorno não superiores a 2 anos. Já o leito maior é denominado como a região alagada pelo extravasamento do escoamento do leito menor, sendo o evento denominado como inundação ribeirinha (TUCCI, 2005).

Figura 01 – Representação dos leitos menor e maior de um rio



Fonte: Tucci (2005, p.28) adaptado por Rosin (2016).

Segundo Ferreira (2017), a problemática relacionada às inundações ribeirinhas se dá pelo fato dos eventos ocorrerem em períodos com intervalos relativamente longos, dependendo da região e, dessa forma, os habitantes acabam se apropriando dessas áreas, por serem relativamente planas, economicamente mais viáveis, e por estarem mais próximas ao rio, tem acesso à água de forma facilitada para usos diversos de forma gratuita.

Em um estudo realizado por Cera *et al.* (2020), os mesmos relataram que, na cidade de Alegrete – RS, a população enfrenta recorrentes inundações devido a elevação do nível da água no rio. Em uma pesquisa com os moradores de três bairros com maior susceptibilidade às inundações, os mesmos responderam que as perdas de móveis e eletrodomésticos são constantes, 50% já receberam ajuda de órgãos públicos em períodos de calamidade, porém, 57% não aceitariam se mudar para outra residência mesmo que em um local mais apropriado.

De acordo com Farias (2019), a recorrência de eventos extremos de precipitação registrados em centenas de cidades brasileiras tem gerado preocupação nas instituições públicas

e privadas, uma vez que as inundações vêm causando, a cada ano, sérios prejuízos. A mesma concluiu no seu trabalho que um padrão cultural na população e nos órgãos públicos repete-se nestes municípios com relação às políticas públicas, aplicação da gestão e incluindo também relações entre a sociedade e o ambiente.

3.2 Estimativas de precipitações e vazões máximas

Bacias hidrográficas pequenas dificilmente possuem dados coletados de vazão e nível de água. Dessa forma, costuma-se utilizar métodos de estimativas de vazões máximas a partir de características locais de chuvas intensas. Esses métodos podem ser aplicados com eventos de chuva observados ou eventos idealizados, sendo este último associado a um tempo de retorno ou probabilidade para que seja superado, denominados chuvas de projeto (COLLISCHONN *et al.*, 2015).

A modelagem probabilística de variáveis hidrológicas pode ser realizada por meio de duas metodologias. Utilizando séries de máximos anuais, sendo considerado apenas o maior evento em cada ano hidrológico ou empregando as séries de duração parcial, também denominadas de séries de picos acima de um limite, que incluem todos os picos que superaram o valor selecionado como referencial (PINTO *et al.*, 2007).

Para análise estatística, deve-se encontrar uma distribuição de extremo que melhor se ajuste aos dados medidos e assim estimar os parâmetros da distribuição para obter as estimativas de probabilidade que apresentem resultados satisfatórios (MENDONÇA, 2016). A distribuição de Gumbel, por exemplo, é a mais aplicada na análise de vazões de inundações (PINTO *et al.*, 2007), porém, outros modelos de distribuição também são utilizados como o Log-Normal 2P, Log-Normal 3P e Log-Pearson tipo III (COLLISCHONN *et al.*, 2015).

Miranda *et al.* (2017) estudaram o comportamento de modelos probabilísticos na predição de precipitações máximas diárias anuais no município de Divinópolis-MG e concluíram, após verificação do teste do Qui-Quadrado, que o modelo probabilístico que melhor representou os dados das precipitações máximas foi o de Gumbel.

Hartmann *et al.* (2011) já haviam concluído anteriormente em um estudo que a distribuição de Gumbel apresentou ótimo comportamento nos testes de Kolmogorov-Sminorv (K-S) realizados para os períodos de tempo considerados, comprovando que a distribuição utilizada apresenta um bom ajustamento aos dados observados para representar precipitações máximas.

As metodologias utilizadas para cálculos das vazões máximas comumente empregadas são o método Racional e o método do Soil Conservation Service (SCS). O método racional é muito utilizado nas estimativas para bacias pequenas (TUCCI, 2014), enquanto que, o método do SCS tem seu uso é recomendado em bacias hidrográficas de até 250 km². O mesmo tem objetivo de estabelecer relações entre a precipitação e as condições da superfície da bacia para estimativa do escoamento superficial com a avaliação do tipo do solo, cobertura vegetal e umidade antecedente determinação do Curve Number (CN), conhecido como o coeficiente de deflúvio deste método (ALVES, 2016).

O método do Soil Conservation Service é indicado pelo Departamento de Água e Energia de São Paulo (DAEE) para o dimensionamento de dispositivos hidráulicos em bacias com áreas superiores a 2 km², quando não há dados históricos fluviométricos (PAULINO, 2014).

Yogi (2018) comparou o método, em sua dissertação, com outros modelos de conversão precipitação-vazão e dados observados. O mesmo concluiu que o método tem uma boa capacidade de resposta para a verificação do deflúvio sobre a bacia com condições de integrar os estudos hidrológicos para renovação de outorga, além disso, o método se mostrou simples e com uma boa base de referência.

Paulino (2014) faz um adendo no seu estudo com relação à sensibilidade nos parâmetros de entrada necessários para utilização do método. O mesmo pontuou que variações de 10% no valor do CN, por exemplo, podem gerar discrepância em torno de 60% nos picos dos hidrogramas, logo, os dados inseridos devem ser analisados de forma criteriosa para que os mesmos se aproximem o máximo dos valores reais.

3.3 Propagação de ondas de cheia

De acordo com Collischonn *et al.* (2015), os estudos de propagação de vazão em rios têm como objetivo determinar o hidrograma de vazões em uma seção transversal com base no hidrograma conhecido em uma ou mais seções à montante. Estes estudos tornam-se ainda mais essenciais quando o objetivo é determinar o comportamento de uma onda de cheia ao longo de um rio natural ou canal artificial.

Realizar estudos de propagação de ondas de cheia em canais naturais tem maior complexidade do que fazer um estudo num canal prismático e retilíneo, pois mesmo que não

haja afluentes, outros fatores como variação espacial da calha, declividade e rugosidade implicam numa modelagem mais difícil do fenômeno (PORTO, 2006).

O Método de Muskingum-Cunge é um método de propagação de escoamentos em rios e canais e é semelhante ao Muskingum, porém, possui a vantagem de utilizar somente dados que são facilmente obtidos para a sua calibração. Esse método tem como fundamento as equações de difusão da onda de enchente provenientes das equações da continuidade e do movimento, logo, pode ser aplicado com bons resultados na maioria dos rios e canais (TOMAZ, 2008).

3.3.1 HEC-HMS

O HEC-HMS é um *software* gratuito desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) em 2000. O mesmo consiste em um modelo determinístico de distribuição por sub-bacias, em que as mesmas são interligadas aos canais de drenagem onde são aplicados os cálculos de propagação de onda de cheia para a transferência de hidrogramas a uma seção à jusante. Um dos modelos de propagação de ondas que compõe o *software* é o de Muskingum-Cunge (USACE, 2016).

Andrade (2017) realizou estudos com o HEC-HMS aliado ao método de Muskingum-Cunge no diagnóstico de áreas suscetíveis a inundações em Guidoal - MG e obteve resultados satisfatórios comparados ao evento que ocorreu em 2012, que se tem o registro das áreas atingidas pela água no município, permitindo que outras simulações fossem realizadas para diferentes ocorrências de precipitação. A mesma avaliou como boa a metodologia e que a mesma pode ser replicada a outras regiões que também se encontram suscetíveis a tais fenômenos e não possuem dados suficientes para a sua quantificação.

Silva *et al.* (2014) utilizaram o *software* para propagações de ondas de cheia na bacia do rio Kenali, no Sri Lanka. Os parâmetros do modelo foram calibrados para um evento de chuva intensa que ocorreu em 2005 e o mesmo foi validado utilizando dados hidrológicos dos eventos ocorridos em 2008 e 2010. Os autores ressaltaram a capacidade do modelo em simular a magnitude e velocidade dos picos de cheia na bacia do rio estudado, constituindo uma importante ferramenta para previsão de inundações.

3.4 Áreas suscetíveis a inundações

Susceptibilidade significa algo ou alguém passível de receber modificações ou sofrer ações quaisquer, ou seja, a predisposição à ocorrência de um acaso. Dessa forma, a susceptibilidade a inundações em uma região está diretamente relacionada à probabilidade dela em ser atingida por alagamentos (PROCHMANN, 2014).

O reconhecimento de áreas suscetíveis a inundações é essencial para o planejamento urbano e está previsto na Lei Federal 6766/79, que dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano. A definição de terrenos alagadiços e sujeitos a inundações depende da definição de qual é o nível de inundação inaceitável, que em geral, está associado ao conceito de tempo de recorrência. O ideal seria realizar os estudos com diversos períodos de retorno para todos os rios com o detalhamento das alturas de lâminas d'água, velocidade do escoamento, porém, é uma atividade longa e trabalhosa, apesar de desejável e fundamental para gestão adequada de risco de inundações em cidades (MIRANDA, 2016).

O gerenciamento de áreas suscetíveis a inundações deve ser iniciado por meio dos resultados gerados pela identificação dos riscos, ou seja, pelo mapeamento do evento, com o objetivo de reconhecer de forma mais detalhada o cenário presente de um determinado local. Neste processo ainda há uma carência de material técnico disponível além de profissionais habilitados, envolvidos na determinação das faixas de risco ao meio como um todo (REIS, 2015).

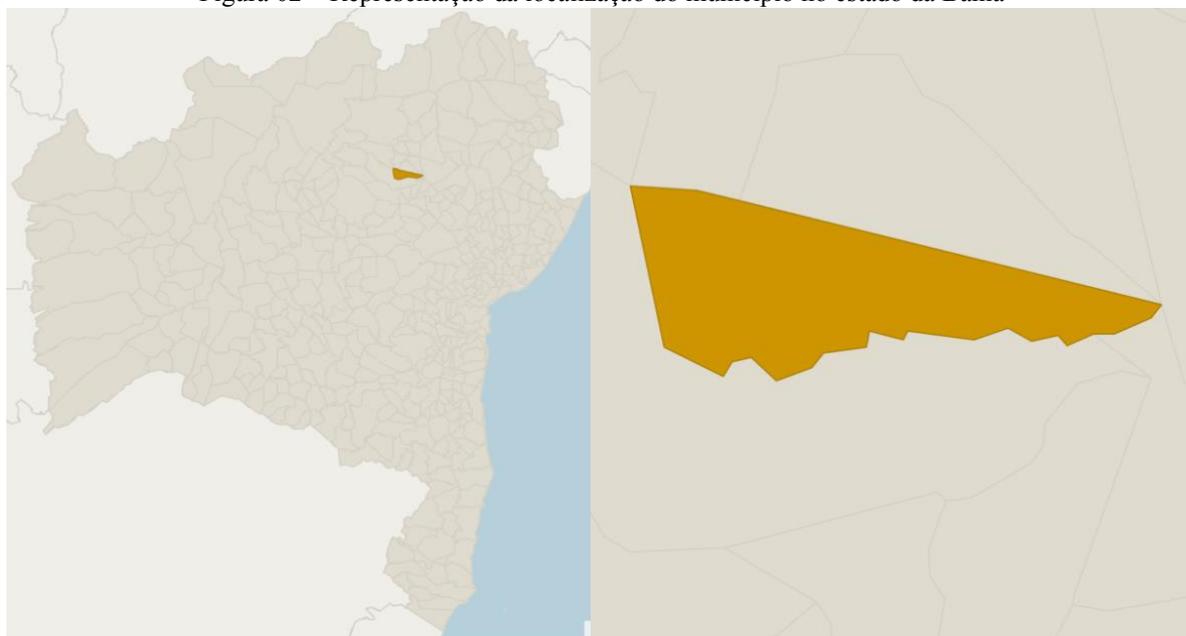
Oliveira *et al.* (2018) realizaram um estudo para a identificação de áreas suscetíveis a inundações no RS e os mesmos concluíram que os próprios órgãos públicos permitem a urbanização dessas áreas, pois utilizam dados subestimados para restringir o parcelamento do solo urbano. Os mesmos afirmaram que é necessária uma revisão na legislação dos municípios ribeirinhos da área de estudo, visando redefinir as áreas sujeitas às inundações, considerando um zoneamento com cotas variáveis de inundação de acordo com a seção do rio.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O município de Caém localiza-se ao centro-norte do estado da Bahia (Figura 02), próximo à cidade de Jacobina, com coordenadas geográficas 11° 05' 00" de latitude Sul e 40° 26' 00" de longitude Oeste (CPRM, 2005). De acordo com o IBGE (2020), possui uma população estimada em 9.058 habitantes em uma área de aproximadamente 540,91 km², o que resulta em uma densidade demográfica de 16,75 hab/km².

Figura 02 – Representação da localização do município no estado da Bahia



Fonte: IBGE, 2020.

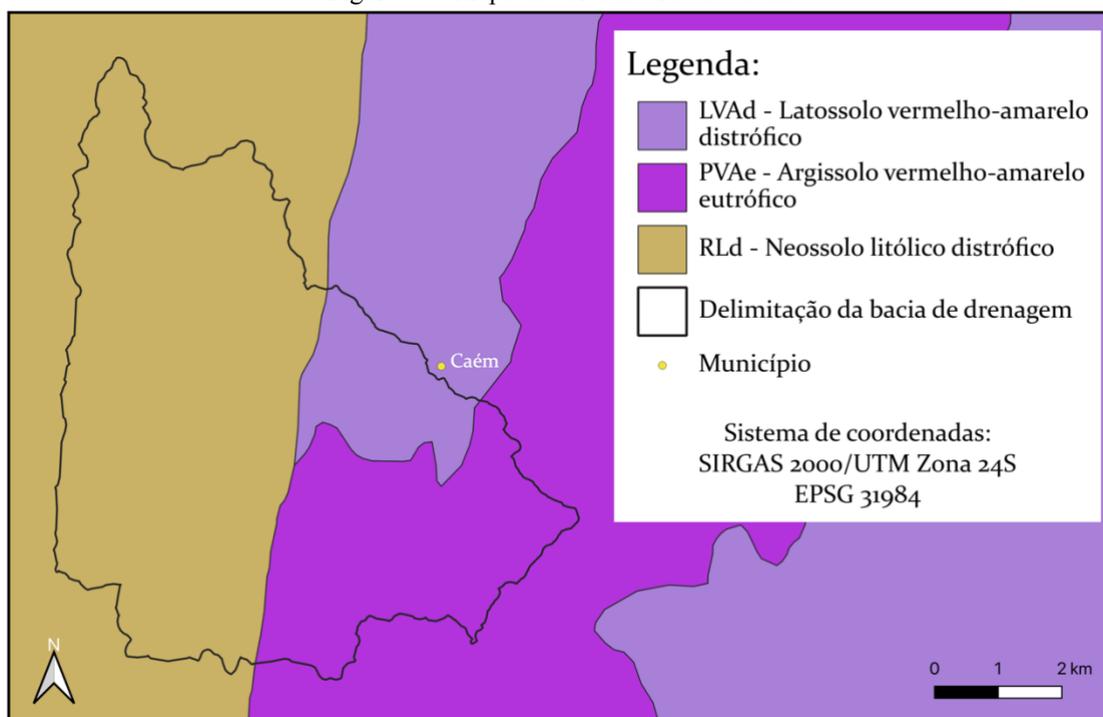
O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Aw – clima tropical com inverno seco, apresentando maior índice pluviométrico nos meses de novembro a abril e nítida estação mais seca no inverno (NOVAIS, 2020).

A vegetação, segundo a CPRM (2005), é representada, em sua maior parte, por florestas estacional semidecidual e ombrófila densa, além de áreas de transição entre cerrado-floresta ombrófila e caatinga-floresta estacional.

O relevo contém a serra de Jacobina, sua encosta oriental e tabuleiros interioranos adjacentes e a drenagem pertence ao alto trecho da bacia do rio Itapicuru, composta pelos rios Charneca, Itapicuru-Mirim e Caém (CPRM, 2005), sendo o último um dos objetos da pesquisa.

No mapa de solos do Brasil fornecido em arquivo vetor (*shapefile*) pelo IBGE (2020), três tipos de composições são compreendidas na bacia: Argissolo vermelho-amarelo eutrófico, neossolo litólico distrófico e latossolo vermelho-amarelo distrófico, como demonstrado na Figura 03.

Figura 03 - Mapa de solos da área de estudo



Fonte: Adaptado do IBGE, 2020.

Segundo a EMBRAPA (2021), os neossolos litólicos são solos rasos próximos a afloramentos rochosos e estão associados normalmente a relevos com maior declividade. Os latossolos vermelho-amarelos são identificados em locais com relevo diversificado, são profundos e ocorrem em ambientes bem drenados, e os argissolos vermelho-amarelos ocorrem em locais de relevo suave a ondulado, mas apesar da elevada capacidade de água disponível, podem apresentar limitações com relação à pouca profundidade e presença de cascalhos.

4.1.1 Delimitação da bacia de drenagem

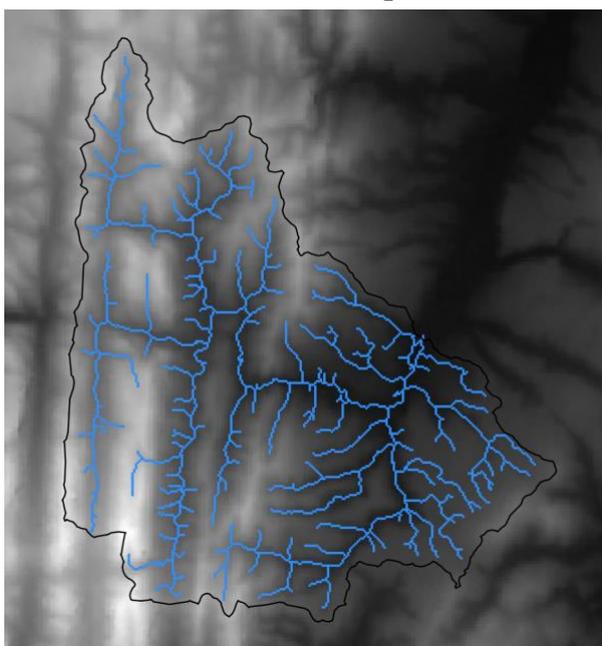
Para delimitação da bacia de drenagem, foram utilizados Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtidos da *Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM* (USGS, 2021) com sistema de coordenadas geográficas Datum WGS-84. Trata-se de imagens com dados altimétricos de 30 metros de resolução horizontal e 1 metro de resolução vertical (BRAZ *et al.*, 2018).

Inicialmente, o MDE foi reprojetoado para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 /UTM Zona 24S, no qual o SIRGAS 2000 foi estabelecido desde 2005 pelo IBGE como o referencial padrão para estudos e atividades geodésicas no país. A Zona 24S é correspondente à faixa do fuso onde a área de estudo está localizada.

Logo após a reprojeção, o arquivo *raster* foi tratado para correção de eventuais imperfeições associadas às captações realizadas pelos satélites e/ou no processo de escrita das imagens, por exemplo, depressões espúrias e pixels sem valores. As correções foram realizadas utilizando a extensão SAGA instalada no software QGis 3.18, com a função *Fill Sinks* (preencher depressões), no qual a mesma realiza os preenchimentos por interpolação linear entre os pixels vizinhos.

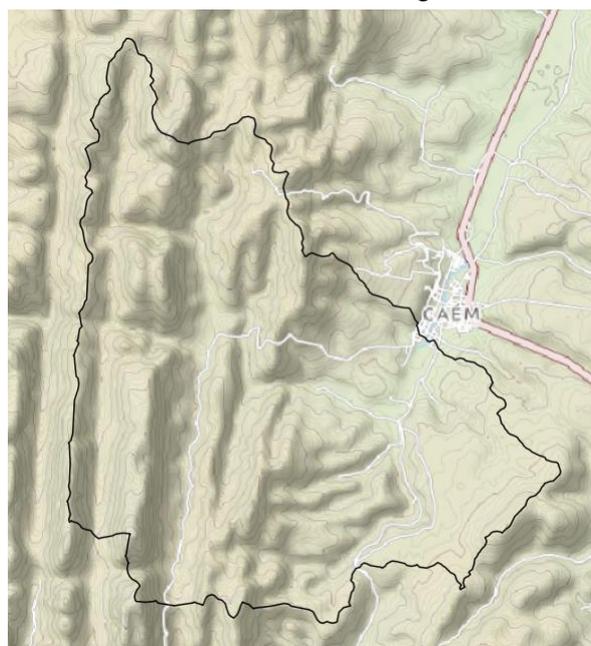
Após a correção das falhas, ainda no QGis, a delimitação dos cursos de água foi executada através da função *r.watershed* presente na extensão nativa GRASS, em que a mesma consiste em estabelecer as direções dos escoamentos a partir dos valores de altitudes presentes no MDE. Através da camada com os fluxos criada no processo anterior e uso da função *w.water.outlet* foi possível obter a delimitação da bacia com demarcação do exutório da bacia no início do perímetro urbano do município (Figura 04). Com a bacia delimitada, foram coletados os dados de área, perímetro e variação de altitude da mesma (Figura 05).

Figura 04 - Delimitação da bacia com os canais de drenagem



Fonte: Autor, 2021.

Figura 05 - Representação da altimetria da bacia de drenagem



Fonte: Autor, 2021.

4.1.2 Caracterização da bacia de drenagem

A região da bacia de drenagem do rio Caém teve a sua área de contribuição reduzida somente à montante do perímetro urbano da cidade, pois para os cálculos das estimativas dos objetivos propostos não se fez necessário agregar as contribuições geradas no trecho urbano. A região delimitada conta com uma área de 44,66 km², perímetro de 35,14 km e relevo com cotas que variam de 468 a 1121 metros de altitude.

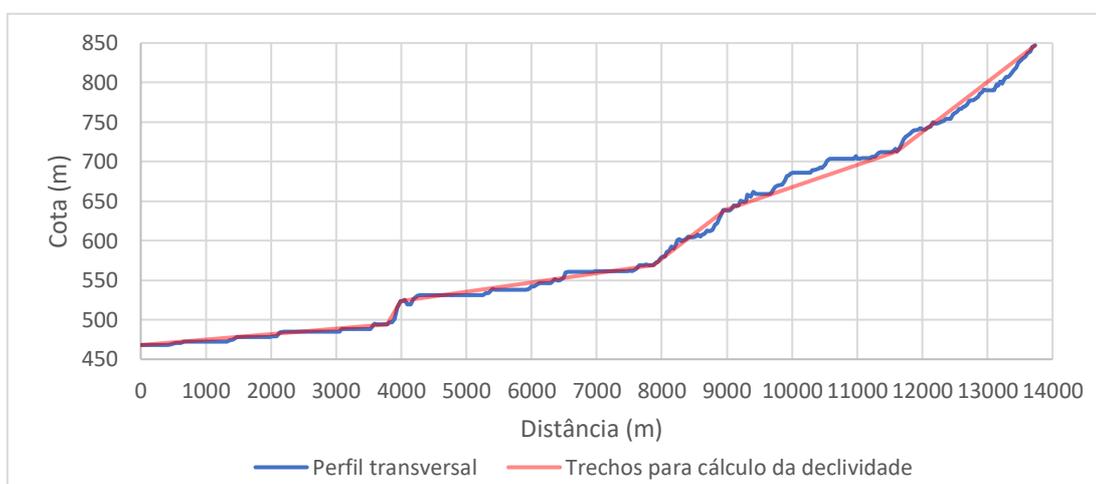
A declividade da bacia foi calculada de acordo com a Equação 01, que se obtém a partir da consideração de que o tempo total do percurso da água no canal natural é equivalente ao tempo do percurso num canal idealizado com declividade constante S_3 (BARBOSA, 2015).

$$S_3 = \frac{L^2}{\left[\sum \left(\frac{L_i}{\sqrt{S_i}} \right) \right]^2} \quad (\text{Equação 01})$$

onde S_i é a declividade do subtrecho (em m/m) e L é o comprimento do subtrecho do talvegue principal (em m), medido a partir da realização de traçado no curso do canal de drenagem até o seu ponto mais distante de contribuição em relação ao perímetro urbano.

A extensão *Profile Tool* instalada no QGis 3.18 foi utilizada para obtenção do perfil longitudinal do talvegue principal (Figura 06), no qual o mesmo possui um comprimento total de 13,73 km, com cota de 847 metros no ponto mais distante e 468 metros no seu exutório, obtendo-se uma declividade de 0,0153 m/m ou 1,53%.

Figura 06 – Perfil longitudinal do talvegue principal



Fonte: Autor, 2021.

Segundo Villela e Mattos (1975), a forma da bacia influencia no escoamento superficial e, conseqüentemente, no hidrograma resultante de uma determinada chuva. A forma é analisada de acordo com relações entre área, perímetro e comprimento do corpo hídrico, onde, quanto menor e mais próximo de 1 for o índice de compacidade Kc (Equação 02) e quanto maior e mais próximo de 1 for o valor do índice de conformação Fc (Equação 03), maior a potencialidade de ocorrerem picos de inundações.

$$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equação 02})$$

$$Fc = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Equação 03})$$

onde P é o perímetro da bacia (em km), A é a área da bacia (em km²) e L é o comprimento do canal principal (em km).

De acordo com o Índice de Compacidade (Kc), a bacia pode ser classificada com tendência mediana a grandes enchentes pois apresenta valor de 1,47 num intervalo de 1,25 a 1,50 para esta categoria. Já com relação ao Índice de Conformação (Fc), a mesma não foi classificada como propensa a enchentes pois apresentou valor de 0,24.

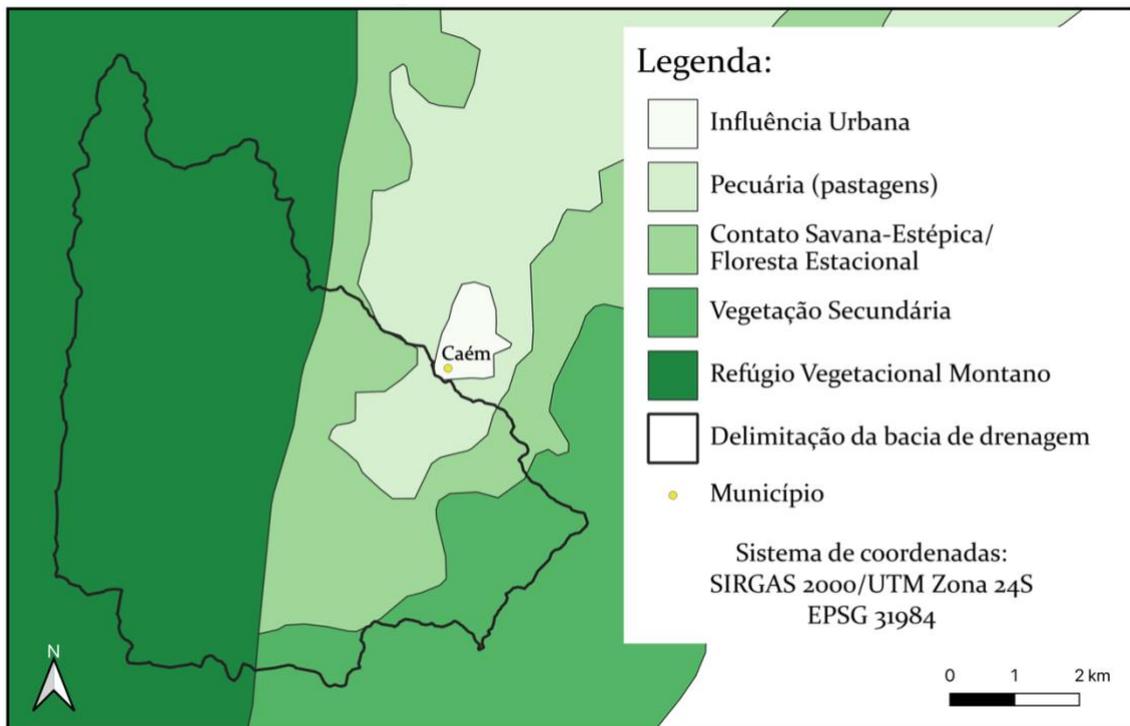
A representação do mapa de uso e ocupação do solo (Figura 07) foi obtida do IBGE (2020) em arquivo vetor (*shapefile*), no qual foi realizada a inclusão da delimitação da bacia de drenagem em estudo utilizando o *software* QGis 3.18 e realizado o cálculo para obtenção das suas respectivas áreas, demonstradas no Quadro 01. As Figuras 08 e 09 representam parte da vegetação da bacia, com florestas densas nas partes de maior declividade e de pastagens num trecho de menor declividade.

Quadro 01 - Características do uso e ocupação do solo na bacia

Uso do solo	Tipo de solo	Área (km ²)
Pecuária	Latossolo Vermelho-Amarelo	2,67
	Argissolo Vermelho-Amarelo	0,48
Savana-Estépica com Floresta Estacional	Latossolo Vermelho-Amarelo	2,59
	Argissolo Vermelho-Amarelo	7,26
Vegetação Secundária	Argissolo Vermelho-Amarelo	4,98
Refúgio Vegetacional Montano	Neossolo Litólico	26,68

Fonte: Autor, 2021.

Figura 07 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia



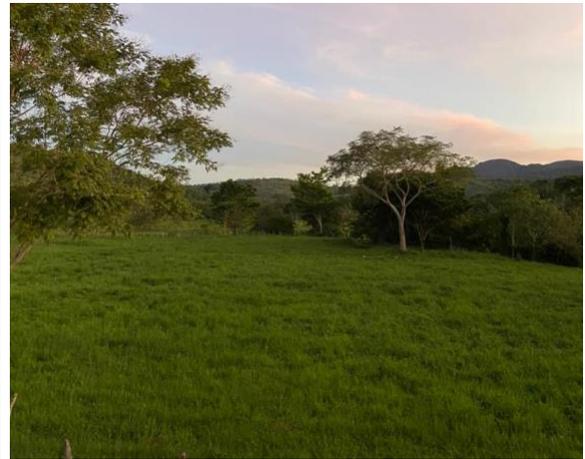
Fonte: Adaptado do IBGE, 2020.

Figura 08 – Florestas densas nas regiões de maior declividade



Fonte: Vídeo Dendê na Mochila (YouTube), 2016.

Figura 09 – Pastagens nas regiões de menor declividade



Fonte: Arielle Lopes, 2021.

Farias Júnior *et al.* (2011) realizaram um estudo com 21 equações para cálculo de tempos de concentração em uma bacia do rio Cônego - RJ, com aproximadamente 30 km² e vegetação composta por florestas estacionais, ombrófilas, campos e pastagens, além de vegetação secundária, sendo estas similares à vegetação da área deste estudo. Os mesmos concluíram que, dentre as formulações semiempíricas, a de George Ribeiro (Equação 04) foi a que apresentou melhor comportamento, com desvio inferior a 1% em relação aos valores referência, dessa forma, a mesma foi adotada para este trabalho.

$$t_c = \frac{16L}{(1,05 - 0,2p)(100I)^{0,04}} \quad (\text{Equação 04})$$

onde t_c é o tempo de concentração (em min), L é o comprimento do talvegue (em km), p é a relação entre a área vegetada e a área total do talvegue principal (de 0 a 1) e I é a declividade do talvegue principal (em m/m).

Com a obtenção dos dados acima, o tempo de concentração (t_c) da bacia foi calculado, obtendo-se um valor de 238,38 minutos, no qual o mesmo é definido como o tempo necessário para que uma partícula de água que é coletada no ponto mais distante da bacia chegue até o exutório da mesma, logo, toda a área da bacia estará contribuindo para o escoamento superficial na saída de uma seção.

4.1.3 Caracterização do trecho urbano

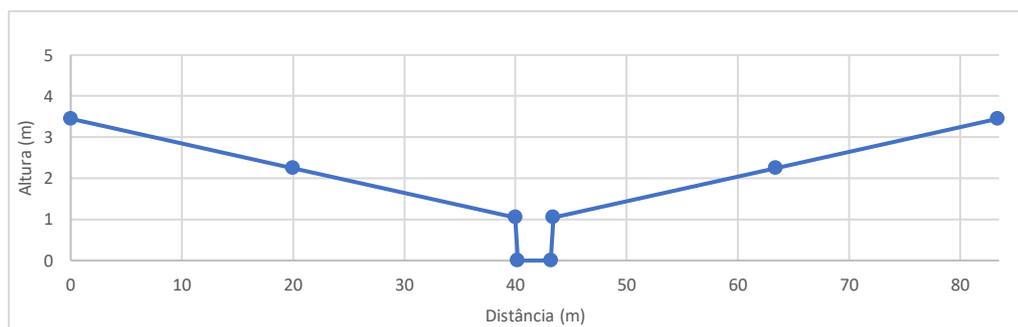
O trecho urbano do município teve a sua área delimitada no software QGis 3.18 de acordo com a densidade de aglomeração de residências. Como o trecho do rio é, relativamente, curto e o perfil longitudinal do mesmo não apresentou grandes variações, foi utilizada a Equação 05 para o cálculo da declividade:

$$S = \frac{h_i - h_f}{L} \quad (\text{Equação 05})$$

onde S é a declividade (em m/m), h_i é a cota à montante, h_f é a cota à justante e L é o comprimento do rio no trecho urbano (em m).

O comprimento e as cotas de montante e jusante do rio no perímetro urbano foram obtidas com a utilização da extensão *Profile Tool*, no qual o mesmo possui 2,02 km, cota inicial e 468 metros e cota final de 461 metros. Dessa forma, a declividade encontrada foi de 0,0035 m/m. Já para obtenção do perfil transversal do mesmo, foram realizadas medidas *in loco* em um trecho onde as marcas da inundação ainda permanecem, obtendo-se as medidas aproximadas de 1,05 metros para a profundidade, 3,0 metros de largura no fundo do leito e 3,4 metros de largura no topo do leito (Figuras 10 a 12).

Figura 10 - Representação do perfil transversal do rio



Fonte: Autor, 2021.

Figura 11 - Local onde foram coletadas as medidas das marcas deixadas pela inundação



Fonte: Adriano Gomes, 2019.

Figura 12 - Trecho onde danos materiais foram causados pela inundação



Fonte: Adriano Gomes, 2019.

4.2 Tratamento e análise de dados hidrológicos

Foram obtidas séries históricas com dados de precipitações diárias de estações pluviométricas localizadas no município de Caém através do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional das Águas (ANA) e do Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA). As informações das mesmas estão descritas no Quadro 02.

Quadro 02 - Estações pluviométricas

Responsável	Código	Latitude	Longitude	Período
ANA	1140020	-11,0942	-40,4350	1959 a 2000
ANA	1140039	-11,0936	-40,4325	2000 a 2014
INEMA	EDBA	-11,0920	-40,4360	2000 a 2012

INEMA	IT-PT-35	-11,0930	-40,4380	2000 a 2020
--------------	----------	----------	----------	-------------

Fonte: Autor, 2021.

Foram analisados os intervalos disponíveis de monitoramento dos dados e as falhas existentes nos períodos de medições nas séries supracitadas. Como resultado desta análise, foram excluídos os anos que haviam ao menos um mês sem coleta de dados pois para a análise das precipitações máximas diárias anuais, não se pode afirmar que os outros meses do ano realmente foram os de maior precipitação.

4.2.1 Precipitações Máximas Diárias Anuais

Os dados foram ordenados em ordem decrescente e unificados em uma só tabela com o intuito de obter uma série com valores que representassem melhor o comportamento das precipitações atualmente, já que a série mais longa (disponibilizado pela ANA) contava apenas com dados até o ano 2000. A fim de se obter as frequências de excedência, foram utilizados 30 valores de precipitação máxima diária anual. As frequências relativas aos eventos hidrológicos foram alcançadas através do Método de Weibull (Equação 06), descrita na forma:

$$f = \frac{i}{n + 1} \quad (\text{Equação 06})$$

onde f é a frequência de excedência, i é a posição ocupada pelo dado de precipitação na série histórica e n é o tamanho dessa série (ALVES *et al.*, 2013).

Com base nos valores da frequência de excedência encontrados, foram calculados os períodos de retorno associados a cada uma das precipitações como indicado na Equação 07:

$$TR = \frac{1}{f} \quad (\text{Equação 07})$$

onde TR é o período de retorno (em anos).

Para ajuste dos valores encontrados, foi utilizada a distribuição estatística pelo Método de Gumbel, em que a probabilidade de um valor extremo dado ser superado é fornecida pela Equação 08:

$$P = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (\text{Equação 08})$$

onde y é chamada de variável reduzida e é dada pela Equação 09:

$$y = (x - x_f) \frac{S_n}{S_x} \quad (\text{Equação 09})$$

no qual x_f é a moda dos valores extremos e é encontrada através da Equação 10:

$$x_f = x_m - S_x \left(\frac{y_n}{S_n} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

onde x_m e S_x são a média e o desvio-padrão das precipitações máximas diárias anuais, respectivamente, e y_n e S_n são a média e o desvio-padrão da variável reduzida, respectivamente (VILLELA e MATTOS, 1975).

Dessa forma, foram realizados os ajustes para as frequências e períodos de retorno de cada uma das precipitações da série e um gráfico foi plotado para tais valores com exibição de uma linha de tendência do tipo logarítmica.

4.3 Estimativas de vazões máximas

4.3.1 Evento de precipitação extrema de 2019

Em 02 de abril de 2019 ocorreu um evento de precipitação que causou prejuízos aos habitantes atingidos pela inundação ribeirinha causada pelo rio na zona urbana do município. Os danos causados compreendem devastação de plantações, morte de animais domésticos, alagamento de residências e demolição de muros.

Dessa forma, este evento foi selecionado para estimativa da vazão extrema pois além da disponibilidade de dados de precipitação discretizados de 10 em 10 minutos, coletados por pluviógrafo instalado na estação IT-PR-35 do INEMA, foram também coletadas medidas das marcações deixadas pela inundação em uma das residências, assim, o modelo hidrológico foi ajustado para melhor representar o comportamento da bacia.

O método utilizado para transformação dessa precipitação em escoamento superficial foi o SCS. O mesmo admite que após uma precipitação, a razão entre a altura de precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial e a capacidade máxima de retenção de água na bacia é igual à razão entre a precipitação excedente e o escoamento superficial potencial. O escoamento superficial potencial é definido como sendo a diferença

entre a precipitação e as perdas iniciais que ocorrem até a saturação da superfície (PORTELA, 2006).

Assumindo a hipótese que a altura da precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial é a diferença entre a precipitação e a precipitação efetiva. O SCS admite que as perdas iniciais correspondam a 20% da capacidade máxima de retenção de água na bacia hidrográfica. Assim, a expressão para o cálculo da precipitação efetiva do evento, segundo Collischonn *et al.* (2015) é dada pela Equação 11:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (\text{Equação 11})$$

onde I_a são as perdas iniciais e representa o valor de $0,2S$. A Equação 11 é válida apenas para a condição $P > I_a$, caso contrário, $P_e = 0$.

Para determinar a retenção máxima da camada superior do solo S , este parâmetro foi relacionado com o *Curve Number (CN)* pela Equação 12:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Equação 12})$$

O parâmetro CN varia em uma escala de 1 a 100, que representa as condições de cobertura e solo, variando de uma cobertura muito permeável a uma cobertura completamente impermeável. A sua determinação foi realizada de acordo com o mapa de uso do solo na bacia e características descritas nos Quadros 03 e 04, em que, uma média ponderada foi realizada para que um único CN representativo fosse obtido.

Quadro 03 - Grupos de solos e suas características

Classificação do solo	Características do solo
Solo A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e possuem alta infiltração. Os latossolos vermelhos e vermelho-amarelos podem ser enquadrados neste grupo.
Solo B	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média. Os argissolos e alguns latossolos com horizonte A mais arenoso e B mais adensado podem fazer parte deste grupo.
Solo C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo. Os cambissolos se enquadram neste grupo.
Solo D	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial. Os neossolos litólicos e alguns cambissolos podem ser classificados neste grupo.

Fonte: Silva *et al.*, 2013.

Quadro 04 - Valores de CN para diferentes tipos e ocupações de solo

Uso do solo	Superfície	Classificação do solo			
		A	B	C	D
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: Adaptado de Tucci, 2009.

O valor do CN encontrado no procedimento anterior equivale ao estado de umidade ideal nas condições próximas à capacidade de campo, conhecida como CN_{II} (ALVES, 2016). Dessa forma, foi necessário realizar um ajuste para que o CN fosse adotado com a condição de umidade de acordo com a dinâmica hidrológica do local estudado.

O SCS (USBR, 1986) definiu três condições de umidade antecedente do solo (AMC I, II e III) com base na precipitação total acumulada nos 5 dias antecedentes ao evento estudado, em que:

- **Condição I:** Os solos da bacia hidrográfica estão secos, mas não ao ponto de murchamento das plantas, é quando se ara ou cultiva bem o solo.
- **Condição II:** É o caso em que os solos se encontram na umidade ideal, isto é, nas condições que precederam a ocorrência de uma enchente.
- **Condição III:** Condição em que os solos se apresentam quase saturados devido a ocorrência de chuvas fortes ou fracas e baixas temperaturas durante 5 dias anteriores a uma determinada precipitação.

As condições de umidade antecedente podem ser identificadas a partir de limites sazonais de precipitação estabelecidos. Esses limites constam no Quadro 05:

Quadro 05 - Limites sazonais para as condições de umidade antecedente (AMC)

Condições de umidade antecedente (AMC)	Precipitação acumulada nos 5 dias antecedentes	
	Estação seca	Estação úmida
I	< 13mm	< 36mm
II	13mm a 28mm	36mm a 53mm
III	> 28mm	> 53mm

Fonte: Silva *et al.*, 2013.

Caso os valores encontrados na análise das precipitações acumuladas se enquadrem fora da AMC II, os CNs devem ser ajustados às condições ACM I ou AMC III utilizando as Equações 13 ou 14 (SILVA *et al.*, 2013), respectivamente:

$$CN_I = \frac{4,2 * CN_{II}}{10 - 0,058 * CN_{II}} \quad (\text{Equação 13})$$

$$CN_{III} = \frac{23 * CN_{II}}{10 + 0,13 * CN_{II}} \quad (\text{Equação 14})$$

onde CN_I é o resultado do ajuste para a AMC I, CN_{II} é o resultado obtido a partir do Quadro 03, e CN_{III} é o resultado do ajuste para a AMC III.

Usualmente é empregado um fator para correção do valor da chuva que atinge as bacias hidrográficas, visto que quanto maior a área da bacia, menor a probabilidade das mesmas terem toda a sua extensão atingida simultaneamente por chuvas intensas (SCHUSTER, 2014).

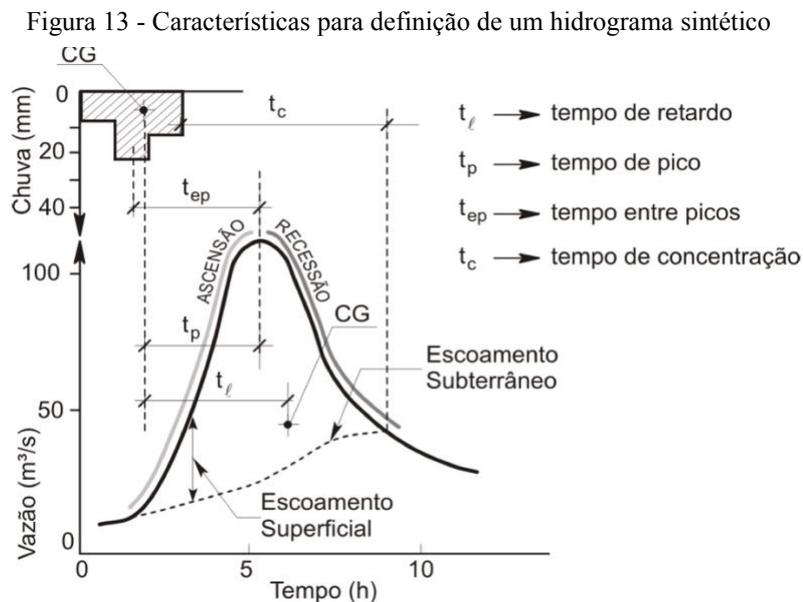
O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT (BRASIL, 2005), apresentou suas considerações sobre a espacialização de dados pontuais para a obtenção de chuvas médias. Com base em estudos realizados pelo United States Weather Bureau - USWB, o DNIT realizou os ajustes e estabeleceu a seguinte equação para aplicação no Brasil para bacias de até 5.000 km²:

$$FRA = \frac{y}{y + \log^2 \left(\frac{A}{5} \right)} \quad (\text{Equação 15})$$

$$y = 35 * \log(0,7d + 1) \quad (\text{Equação 16})$$

onde d é duração da chuva (em horas), A é área da bacia (em km^2) e y é um coeficiente empírico. Assim, o Fator de Redução de Área obtido foi multiplicado pelos valores da precipitação máxima para que os dados de chuva fossem ajustados antes dos cálculos de vazão.

Para representação da conversão da precipitação em vazão, é necessário aplicar método do hidrograma unitário (HU), que representa a resposta da bacia a uma precipitação de volume unitário de duração Δt . O mesmo pode ser plotado com base nas características físicas da bacia hidrográfica. Na Figura 13, os parâmetros que caracterizam o hidrograma podem ser visualizados.



Fonte: Collischonn *et al.*, 2015, p.153.

Logo, para construção do hidrograma que representa o escoamento superficial na bacia, foi construído, primeiramente, o hidrograma unitário adimensional a partir da Equação 17 (COLLISCHONN *et al.*, 2015):

$$\frac{q}{q_p} = e^m * \left[\left(\frac{t}{T_p} \right)^m \right] * \left[e^{\left(-m \left(\frac{t}{T_p} \right) \right)} \right] \quad (\text{Equação 17})$$

onde q_p é a vazão de pico (em m^3/s) por mm de chuva efetiva dada pela Equação 18, T_p é o tempo de ascensão do hidrograma dado pela Equação 19, t é o tempo decorrido desde o início da chuva e m é o fator de forma estabelecido como 3,7.

$$q_p = \frac{0,208 * A}{T_p} \quad (\text{Equação 18})$$

$$T_p = 0,6 * t_c + \frac{d}{2} \quad (\text{Equação 19})$$

onde A é a área da bacia (em km²), t_c é o tempo de concentração e d é a duração da chuva.

Ao aplicar a equação para cada intervalo de chuva, foi obtido um hidrograma representativo para este intervalo pelo processo de convolução, que consiste no princípio da proporcionalidade e superposição para estudos de sistemas lineares invariantes no tempo. O somatório das vazões após a convolução constituíram o hidrograma adimensional referente à precipitação. O processo de convolução (Equação 20) tem a forma:

$$\begin{aligned} Q_1 &= P_1 * h_1 \\ Q_2 &= P_2 * h_1 + P_1 * h_2 \\ Q_3 &= P_3 * h_1 + P_2 * h_2 + P_1 * h_3 \end{aligned} \quad (\text{Equação 20})$$

onde Q_n é a vazão (em m³/s), P_n é a precipitação efetiva no intervalo de 10 minutos (em mm) e h_n é a ordenada do hidrograma unitário adimensional (em m³/s.mm).

Como não há medições de vazão para o rio estudado, foi preciso estimar a vazão de base do mesmo de acordo com medições realizadas *in loco* para que a mesma fosse considerada nos hidrogramas. O valor encontrado foi adicionado a cada um dos intervalos de 10 minutos dos hidrogramas. Esta estimativa foi realizada utilizando a equação de Manning (Equação 21):

$$Q = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * A * \sqrt{i} \quad (\text{Equação 21})$$

onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning, R_h é o raio hidráulico (em m), A é a área molhada da seção transversal (em m²) e i é a declividade (em m/m).

4.3.2 Eventos de precipitação com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos

Para encontrar os valores das precipitações máximas diárias anuais para os períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos, foi utilizada a tabela proposta por Gumbel (Quadro 06), na qual os valores das variáveis reduzidas (y) já estão determinadas para cada período de retorno. Logo, foi necessário apenas efetuar a substituição da variável na Equação 08 para que os valores extremos fossem encontrados.

Quadro 06 – Variável Reduzida e Períodos de Retorno – Método de Gumbel

Variável Reduzida (y)	Período de Retorno (TR)
0,367	2 anos
2,250	10 anos
2,970	20 anos

Fonte: Adaptado de Villela e Mattos, 1975.

Assim, os hidrogramas de vazão de cada uma das chuvas foram gerados a partir do hietograma da chuva de 2019, porém, com um fator de proporção aplicado já que, como a chuva que ocorreu em 2019 tem um período de retorno de 5 anos, para 2 anos o fator foi de redução e para 10 e 20 anos, o fator foi de ampliação. Esse fator foi calculado a partir da Equação 22:

$$f_{TR} = \frac{P_n}{P_5} \quad (\text{Equação 22})$$

onde f_{TR} é o fator de proporção, P_5 é a precipitação do evento que ocorreu em 2019 (em mm) e P_n é a precipitação com o período de retorno de 2, 10 e 20 anos (em mm).

4.4 Propagação de ondas de cheia

Para propagação das ondas de cheia foi utilizado o software HEC-HMS por meio do Método de Muskingum-Cunge. Segundo Collischonn *et al.* (2015), a equação do método pode ser dada por:

$$Q_{t+\Delta t} = C_1 * I_{t+\Delta t} + C_2 * I_t + C_3 * Q_t \quad (\text{Equação 23})$$

onde $Q_{t+\Delta t}$ é a vazão de saída para seção a jusante (m^3/s), $I_{t+\Delta t}$ é a vazão de entrada para seção a jusante (m^3/s), Q_t é a vazão de saída para a seção de montante (m^3/s) e I_t é a vazão de entrada para seção a montante (m^3/s);

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 podem ser estabelecidos através das Equações 24, 25 e 26:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 * K * X}{2 * K * (1 - X) + \Delta t} \quad (\text{Equação 24})$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 * K * X}{2 * K * (1 - X) + \Delta t} \quad (\text{Equação 25})$$

$$C_3 = \frac{2 * K * (1 - X) - \Delta t}{2 * K * (1 - X) + \Delta t} \quad (\text{Equação 26})$$

Os valores de K e X podem ser encontrados a partir de características físicas do rio, como comprimento, largura, declividade, celeridade e vazão de referência utilizando as seguintes equações, onde K é o parâmetro do modelo de Muskingum (Equação 27) e X é responsável pelo controle da atenuação da onda de cheia (Equação 28):

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (\text{Equação 27})$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B * c * S_0 * \Delta x} \right) \quad (\text{Equação 28})$$

onde Δx é o comprimento do trecho do rio (em m), c é a celeridade cinemática da onda de cheia (em m/s), Q é a vazão de referência (em m³/s), B é a largura do rio (em m) e S_0 é a declividade do fundo do rio (em m/m).

Ainda segundo Collischonn *et al.* (2015), uma boa estimativa para a variável da vazão de referência pode ser uma vazão um pouco inferior à vazão máxima do hidrograma, no qual, Tucci (1998) recomenda um valor próximo de 70% da vazão máxima. Dessa forma, a celeridade pode ser calculada utilizando uma equação de escoamento permanente uniforme, como a de Manning, considerando a calha do rio como uma seção transversal em forma trapezoidal ou retangular.

Para evitar erros nos valores do hidrograma de saída, o intervalo de tempo ideal para o Método de Muskingum-Cunge deve ser relativamente pequeno em relação ao tempo de ascensão do hidrograma (COLLISCHONN *et al.*, 2015). O critério para seleção deste intervalo pode ser embasado a partir da fórmula:

$$\Delta t \leq \frac{Tr}{5} \quad (\text{Equação 29})$$

onde Tr é o tempo de ascensão do hidrograma.

O valor de Δx também deve ser escolhido com cautela para que o modelo realmente represente a atenuação que ocorre na onda de cheia. Uma estimativa para obtenção do valor adequado de Δx pode ser dado pela equação (COLLISCHONN *et al.*, 2015):

$$\Delta x \leq \frac{c * \Delta t}{2} \left[1 + \left(1 + 1,5 * \frac{Q}{B * S_0 * \Delta t * c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{Equação 30})$$

onde as descrições das variáveis necessárias para o cálculo estão descritas nas fórmulas para encontrar os valores de K e X .

Com base na celeridade e no intervalo de tempo é possível estimar o valor ideal para em que, caso o valor encontrado seja próximo ao comprimento total do rio (L), é adotado este comprimento total, caso contrário, são realizadas divisões em subtrechos realizando a divisão do comprimento pelo Δx .

O valor de N deve ser inteiro, logo, o resultado encontrado deve ser arredondado para o valor inteiro imediatamente superior, e então, um valor definitivo para Δx deve ser recalculado utilizando a equação citada acima para que o mesmo seja reajustado.

4.4.1 Onda de cheia do evento de 2019

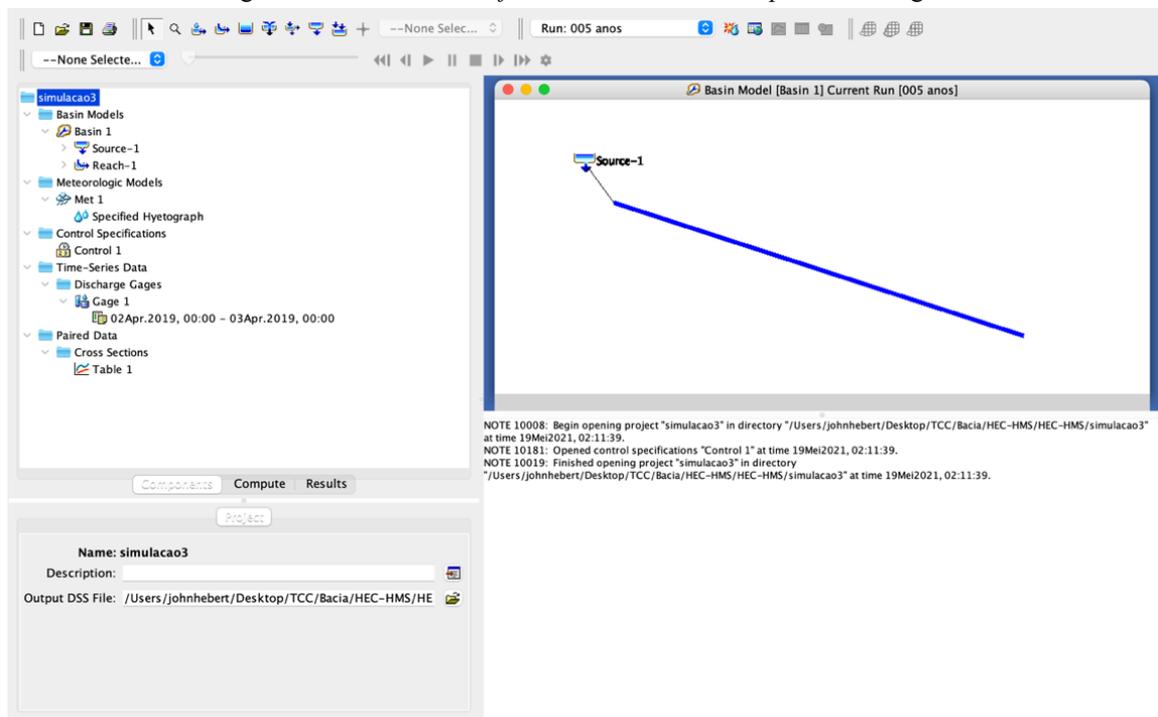
No *software* HEC-HMS, a modelagem foi realizada da seguinte forma (os dados de entrada estão representados no Quadro 07 e a interface na Figura 14):

- *Basin* - neste elemento foi inserido um elemento para representar o rio que sofrerá a propagação (*reach*) e outro para a fonte de água (*source*). Neste mesmo elemento, a fonte de água foi marcada como alimentadora do rio e a opção de propagação da onda foi modificada para Muskingum-Cunge. Dessa forma, foi possível inserir as características físicas do rio e do escoamento requisitadas pelo método como comprimento, declividade, vazão de referência, modificação da seção para o método de 8 pontos para representação da calha do rio, coeficientes de Manning para o leito e margens de acordo com os valores Quadro 08, e onde buscar os dados da seção transversal do rio;
- *Meteorologic model* - foi realizada a conexão com o elemento *basin*;
- *Time-series data* - foi criada uma série temporal de vazões no qual foram estabelecidos os valores de data e horário para construção do gráfico, modificação da discretização dos

intervalos para 10 minutos e, finalmente, foram inseridos os valores do gráfico do hidrograma adimensional obtido para a precipitação de 2019;

- *Cross section* - foi criado o campo para entrada dos 8 pontos para representação da calha do rio relacionados entre distância e cota do ponto.
- *Control specifications* - é o campo que delimita o período da simulação e foi especificado o mesmo período inserido no campo *times-series data*;
- *Run* - uma simulação foi criada e todos os elementos foram computados.

Figura 14 - Interface da *software* HEC-HMS na etapa de modelagem



Fonte: Autor, 2021.

Quadro 07 - Dados de entrada para simulação no *software* HEC-HMS

L (m)	S (m/m)	η rio	η margens	Período inicial	Período final	Intervalo
2023,29	0,0035	0,040	0,15	02/04/2019	03/04/2019	10 min

Fonte: Autor, 2021.

Quadro 08 - Valores de coeficientes de Manning para arroios e rios

	Natureza das paredes	Condição			
		Ótima	Boa	Regular	Ruim
1	Limpos, retilíneos e uniformes.	0,025	0,028	0,030	0,033
2	Como em 1, porém com pedras e vegetações.	0,030	0,033	0,035	0,040
3	Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos.	0,035	0,040	0,045	0,050

4	Como em 3, águas baixas, declividade fraca.	0,040	0,045	0,050	0,055
5	Como em 3, com vegetação e pedras.	0,033	0,035	0,040	0,045
6	Como em 4, com pedras.	0,045	0,050	0,055	0,060
7	Com margens espraçadas, pouca vegetação.	0,050	0,060	0,070	0,080
8	Com margens espraçadas, muita vegetação.	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Adaptado de Porto (2006).

A partir dos resultados obtidos na simulação, como o hidrograma da propagação da onda à justante e o gráfico da velocidade do escoamento, foi possível realizar ajustes no modelo para que melhor se adequasse às medidas obtidas pelas marcas deixadas pela inundação. Dessa forma, foram realizadas dezenas de simulações com modificações no CN e coeficientes de Manning até que fossem obtidos os resultados que melhor representassem o evento de 2019, obviamente, de acordo com características coerentes com a realidade.

4.4.2 Ondas de cheia para diferentes períodos de retorno

Com os ajustes do modelo realizados, foi possível simular as propagações das ondas de cheia para cada um dos hidrogramas gerados pelas precipitações com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos.

O execução do processo foi realizada da mesma forma que o tópico anterior, porém, com pequenas alterações em alguns elementos:

- Para cada simulação, os valores de vazão do hidrograma correspondente ao período de retorno foi alterado no campo do elemento *time-series data*.
- Para cada simulação, a vazão de referência foi alterada no elemento *Basin* de acordo com o pico do hidrograma correspondente, pois a mesma é adotada como 70% do valor da vazão de pico do hidrograma.
- Antes de executar cada simulação, foi criado um novo elemento *Run* e seus dados foram computados para que os resultados anteriores não fossem sobrepostos e perdidos.

4.5 Identificação de áreas suscetíveis a inundações

Para realização do objetivo principal deste trabalho, foram utilizados os dados das simulações das propagações de ondas de cheia executadas no HEC-HMS. A partir dos dados

de vazão de saída e velocidade do escoamento disponibilizados, foi possível aplicá-los na seção transversal do rio para que fossem obtidas as cotas de inundação para cada um dos hidrogramas.

Admitiu-se que a seção do rio, no trecho onde foram realizadas as medidas das marcas deixadas pela inundação, tem a forma representada na Figura 10. Logo, dividindo seu perfil em 2 áreas (trapézio do leito menor e trapézio do leito maior), foi obtida a área total da seção transversal, em que a área do trapézio maior varia de acordo com a cota atingida pela inundação. Dessa forma, foi possível obter também a projeção horizontal da inundação para que fossem definidos os trechos suscetíveis a inundações de acordo com o mapa da cidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação de eventos extremos de chuva a partir da série histórica

A partir da série histórica contendo 30 dados, foi possível verificar as probabilidades de ocorrência e os períodos de retorno para cada uma das precipitações máximas diárias anuais, explicitados na Tabela 01:

Tabela 01 - Precipitações com probabilidades de ocorrência e períodos de retorno

n	Data	Precip.	P (%)	TR (anos)
1	26/12/77	207,0	1,29	77,58
2	29/01/85	130,0	12,69	7,88
3	21/02/07	123,5	15,25	6,56
4	28/11/84	121,0	16,35	6,12
5	22/12/89	117,0	18,26	5,48
6	16/02/76	117,0	18,26	5,48
7	02/04/19	114,4	19,61	5,10
8	06/02/83	114,3	19,67	5,08
9	29/09/82	104,4	25,63	3,90
10	21/10/66	96,7	31,23	3,20
11	17/04/79	95,5	32,19	3,11
12	13/03/69	80,0	46,37	2,16
13	10/11/63	75,4	51,17	1,95
14	15/11/99	72,2	54,63	1,83
15	01/11/80	70,2	56,83	1,76
16	16/11/87	65,8	61,73	1,62
17	21/03/67	65,0	62,63	1,60
18	30/03/68	61,4	66,66	1,50
19	27/01/64	60,8	67,33	1,49
20	10/03/88	60,4	67,78	1,48
21	11/11/98	56,4	72,18	1,39
22	15/10/75	56,0	72,61	1,38
23	10/04/71	55,0	73,69	1,36
24	07/10/90	52,4	76,43	1,31
25	30/04/78	52,4	76,43	1,31
26	23/12/86	50,0	78,88	1,27
27	25/01/70	50,0	78,88	1,27
28	26/03/60	49,6	79,28	1,26
29	12/01/62	48,9	79,97	1,25
30	12/08/59	39,4	88,33	1,13

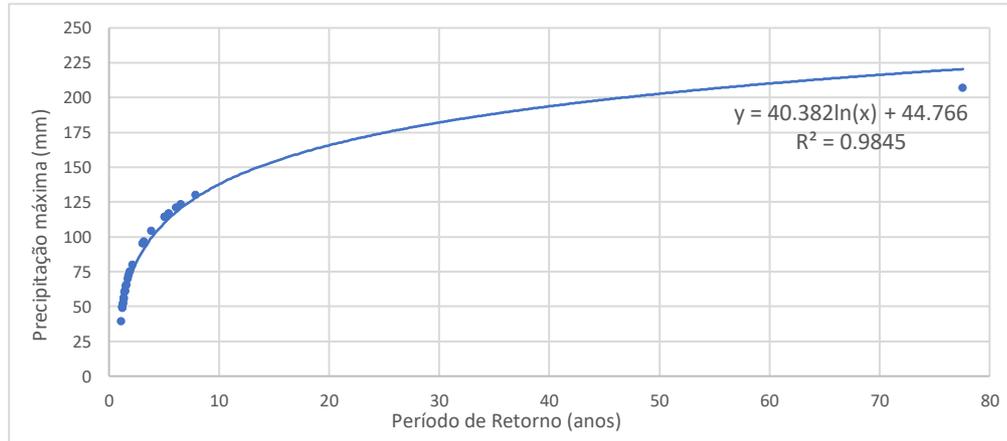
Fonte: Autor, 2021.

Observou-se que menos da metade das precipitações (12 de 30 eventos) tem períodos de retorno maiores que 2 anos e 8 eventos tiveram períodos de retorno maiores que 5 anos, dentre estes, 6 ocorreram nas décadas de 70 e 80 e 2 ocorreram em 2007 e 2019.

Além disso, dentre estes eventos com período de retorno maior que 5 anos, todas as precipitações ocorreram entre os meses de novembro e abril. Dentre todos os 30 dados, 83,33% das precipitações também ocorreram no período citado anteriormente, demonstrando uma forte característica dos climas tropicais com inverno seco - Aw.

Apenas um dos eventos superou o período de retorno de 50 anos e percebeu-se que o mesmo tem precipitação discrepante em relação aos outros com 207,0 mm (Figura 15), porém, ao analisar os dados pluviométricos das séries dos municípios vizinhos, Saúde e Jacobina, foi constatado que chuvas fortes também ocorreram nesta data nas localidades, logo, decidiu-se que dado seria mantido na análise.

Figura 15 - Representação da linha de tendência logarítmica para os períodos de retorno

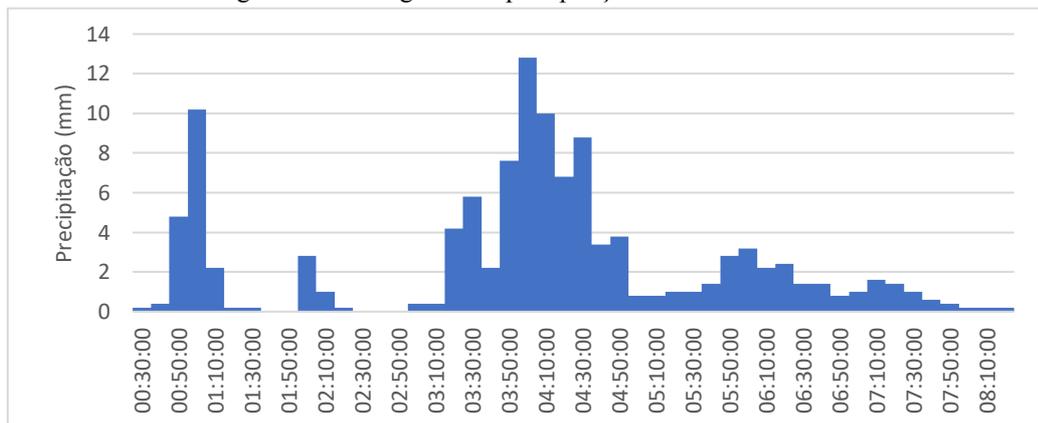


Fonte: Autor, 2021.

O evento extremo que ocorreu em 2019 e causou diversos danos à população com as consequências da inundação, foi associado a um período de retorno de 5,1 anos. Dessa forma, assume-se que para os valores de precipitação maiores que o deste evento, dependendo da concentração da chuva, os danos causados foram de magnitude igual ou superior.

A precipitação em questão ocorreu de forma concentrada num período de, aproximadamente, 8 horas, em que teve início às 00:30 e finalizou às 08:20 (Figura 16). Percebeu-se alguns picos no gráfico da precipitação, atingindo em um dos momentos a concentração de 49,4 mm em 1 hora, considerado chuva de alta intensidade.

Figura 16 - Hietograma da precipitação extrema de 2019



Fonte: Adaptado do INEMA, 2019.

5.2 Estimativa de vazões máximas

5.2.1 Evento de precipitação extrema de 2019

Para aplicação do método Soil Conservation Service, primeiramente, foi realizada uma média ponderada utilizando os dados de áreas e atividades obtidos com o mapa de uso e ocupação do solo da bacia, resultando em um CN de 61,32 (Tabela 02). Como a região se encontrava numa condição AMC I, de acordo com as precipitações acumuladas dos 5 dias antecedentes ao evento (Quadro 09), foi realizado um ajuste utilizando a Equação 13, resultando num CN de valor 39,97.

Tabela 02 - Características físicas da bacia

Uso do solo	Tipo de solo	Classe	Área (km ²)	CN adotado
Pecuária	Latossolo Vermelho-Amarelo	A	2,67	25
	Argissolo Vermelho-Amarelo	B	0,48	59
Savana-Estépica com Floresta Estacional	Latossolo Vermelho-Amarelo	A	2,59	36
	Argissolo Vermelho-Amarelo	B	7,26	60
Vegetação Secundária	Argissolo Vermelho-Amarelo	B	4,98	55
Refúgio Vegetacional Montano	Neossolo Litólico	D	26,68	69
Total			44,66	61,32

Fonte: Autor, 2021.

Quadro 09 - Precipitações dos 5 dias antecedentes ao evento de 2019

Precipitações antecedentes						
Datas	28/03/19	29/03/19	30/03/19	31/03/19	01/04/19	Total
Precip. (mm)	0,60	0,00	0,00	1,40	13,20	15,20

Fonte: INEMA, 2019.

Dessa forma, foram calculadas as perdas iniciais, a precipitação efetiva e as variáveis necessárias para construção dos hidrogramas relacionados ao evento em questão (Tabela 03).

Tabela 03 - Variáveis do hidrograma adimensional

FRA	S (mm)	I _a (mm)	T _p (min)	q _p (m ³ /s/mm)
0,650	160,23	32,05	148,03	3,77

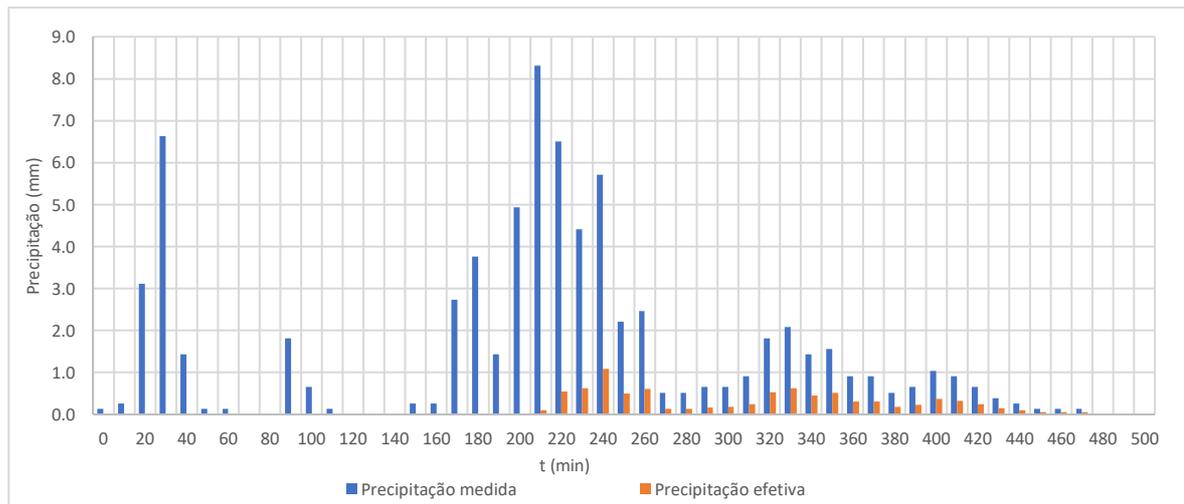
Fonte: Autor, 2021.

Observou-se na Figura 17 que a precipitação efetiva passou a contribuir 210 minutos após o início da chuva. A mesma começou a ser contabilizada no hietograma depois que a precipitação acumulada atingiu 32,05 mm, valor equivalente às perdas iniciais no método SCS.

A partir dos valores do tempo de ascensão, duração da chuva e vazão de pico foi possível obter o hidrograma unitário adimensional característico da bacia (Figura 18), em que o mesmo foi utilizado para confecção dos hidrogramas para cada discretização de 10 minutos (Figura 19), e assim, resultou no hidrograma total após o processo de convolução (Figura 20).

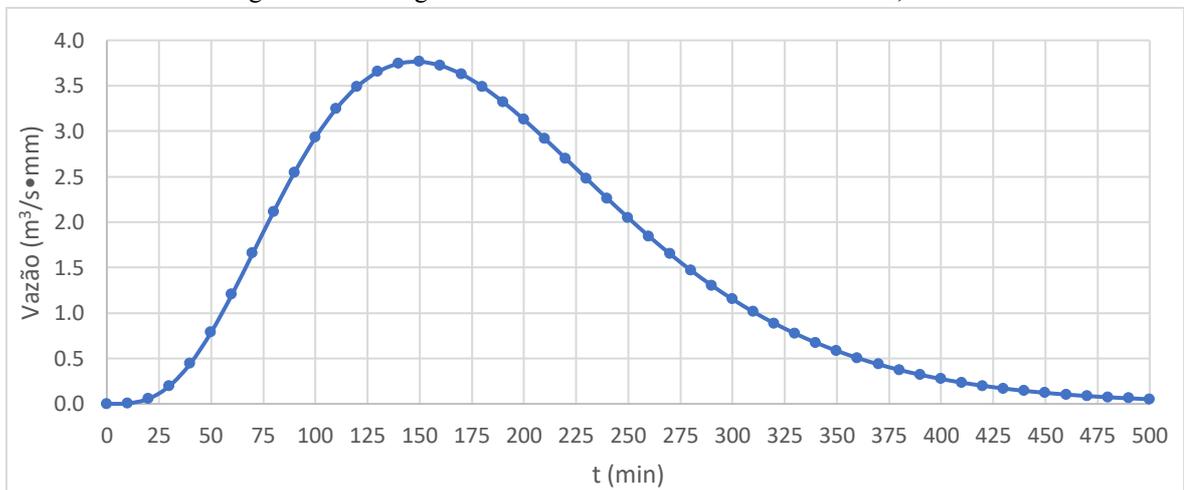
A construção do hidrograma das discretizações foi realizada a partir do cálculo de 48 vazões referentes aos 48 intervalos de 10 minutos de chuva. Dessa forma, a maior vazão encontrada nos intervalos foi de 4,09 m³/s, enquanto que, no hidrograma total, a vazão de pico foi de 23,87 m³/s.

Figura 17 - Hietogramas das precipitações total e efetiva - TR 5,1 anos



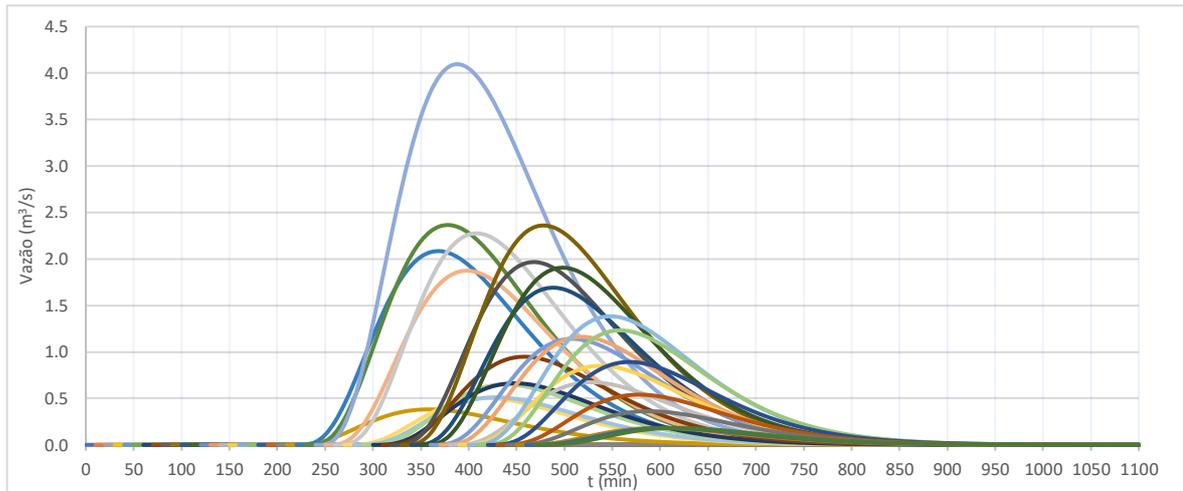
Fonte: Adaptado do INEMA, 2019.

Figura 18 - Hidrograma unitário sintético adimensional - TR 5,1 anos



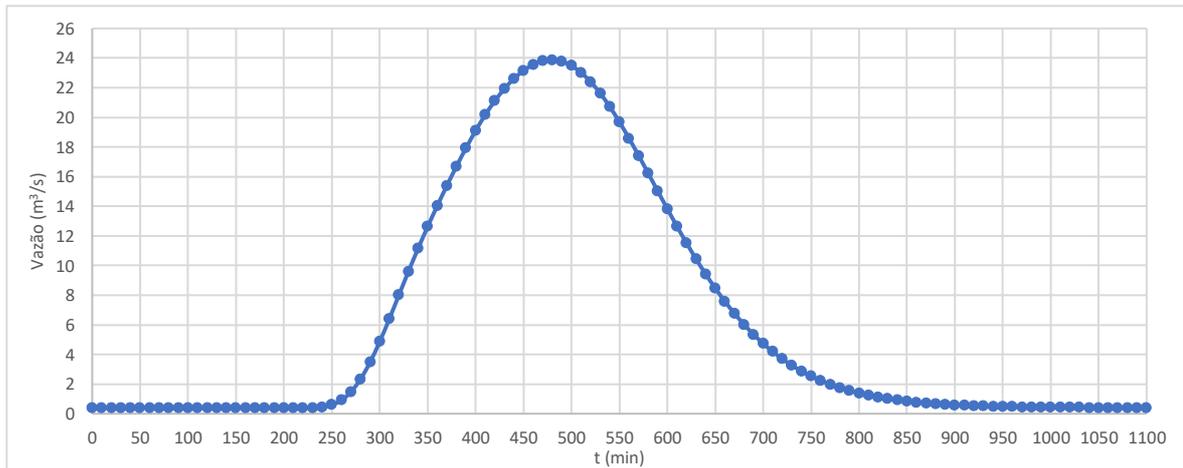
Fonte: Autor, 2021.

Figura 19 - Hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos - TR 5,1 anos



Fonte: Autor, 2021.

Figura 20 - Hidrograma total após o processo de convolução - TR 5,1 anos



Fonte: Autor, 2021.

5.2.2 Vazões máximas para precipitações com períodos de retorno 2, 10 e 20 anos

As precipitações máximas diárias anuais com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos foram encontradas a partir da aplicação da Distribuição de Gumbel, resultando nos valores da Tabela 04:

Tabela 04 - Precipitações com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos

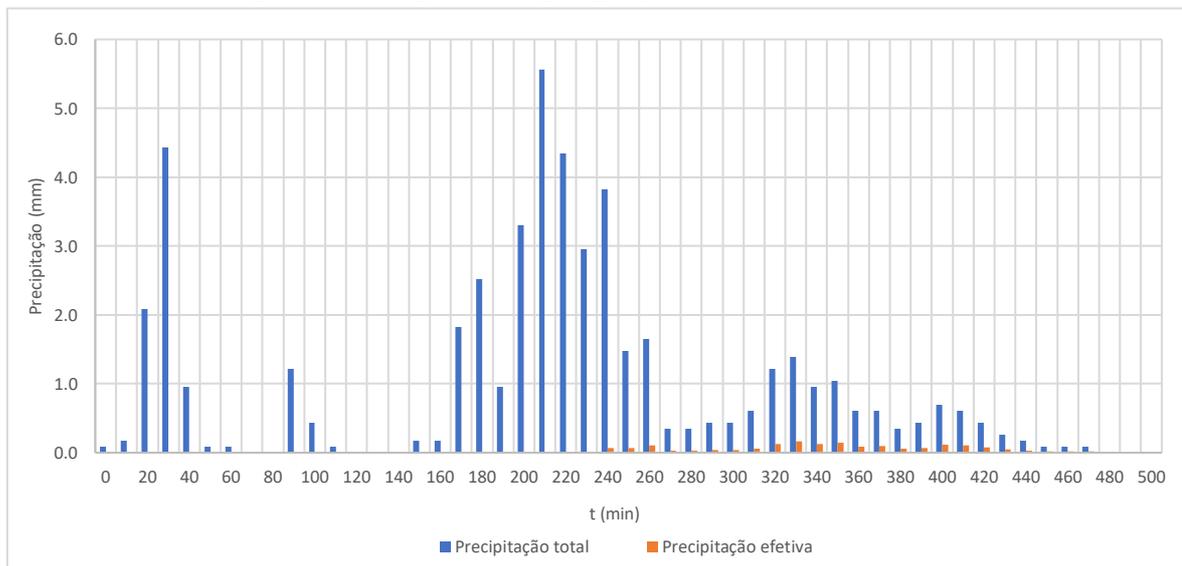
TR (anos)	Precip. (mm)	f_{TR}
2 anos	76,52	0,669
10 anos	138,29	1,209
20 anos	161,90	1,415

Fonte: Autor, 2021.

5.2.2.1 Período de retorno de 2 anos

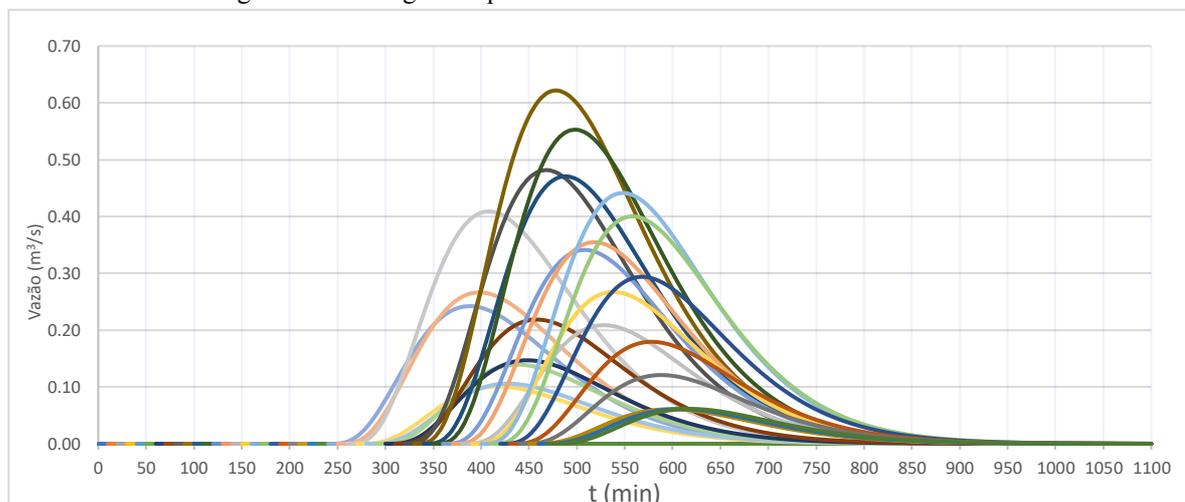
Como esperado para um período de retorno menor, observou-se, na Figura 21, redução na intensidade da chuva em comparação ao evento de 2019 e, conseqüentemente, houve redução dos valores da precipitação efetiva também. Quanto ao hidrograma unitário adimensional, como o mesmo não contém dados de entrada de precipitação, permaneceu inalterado. Já nos hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos (Figura 22), a maior vazão encontrada foi de 0,62 m³/s, enquanto que, no hidrograma total (Figura 23), a vazão de pico foi de 5,61 m³/s.

Figura 21 - Hietogramas das precipitações total e efetiva - TR 2 anos



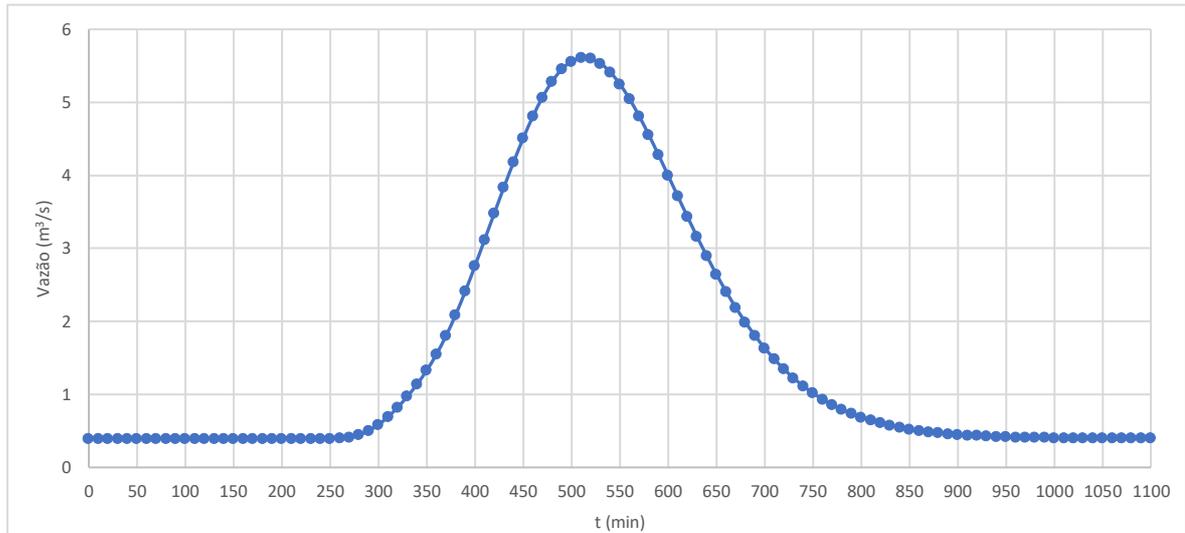
Fonte: Adaptado do INEMA, 2019.

Figura 22 - Hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos - TR 2 anos



Fonte: Autor, 2021.

Figura 23 - Hidrograma total após o processo de convolução - TR 2 anos

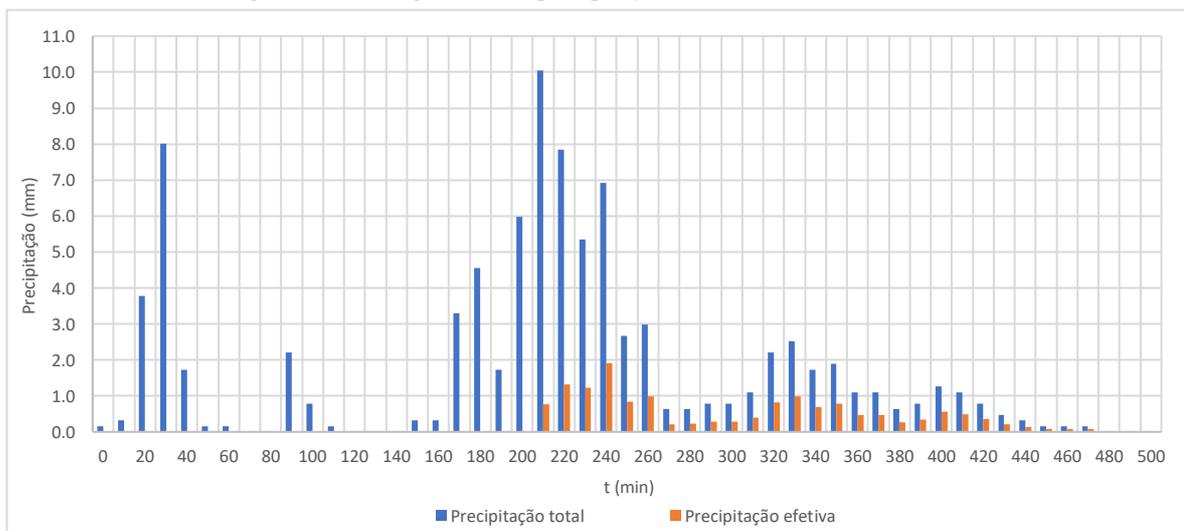


Fonte: Autor, 2021.

5.2.2.2 Período de retorno de 10 anos

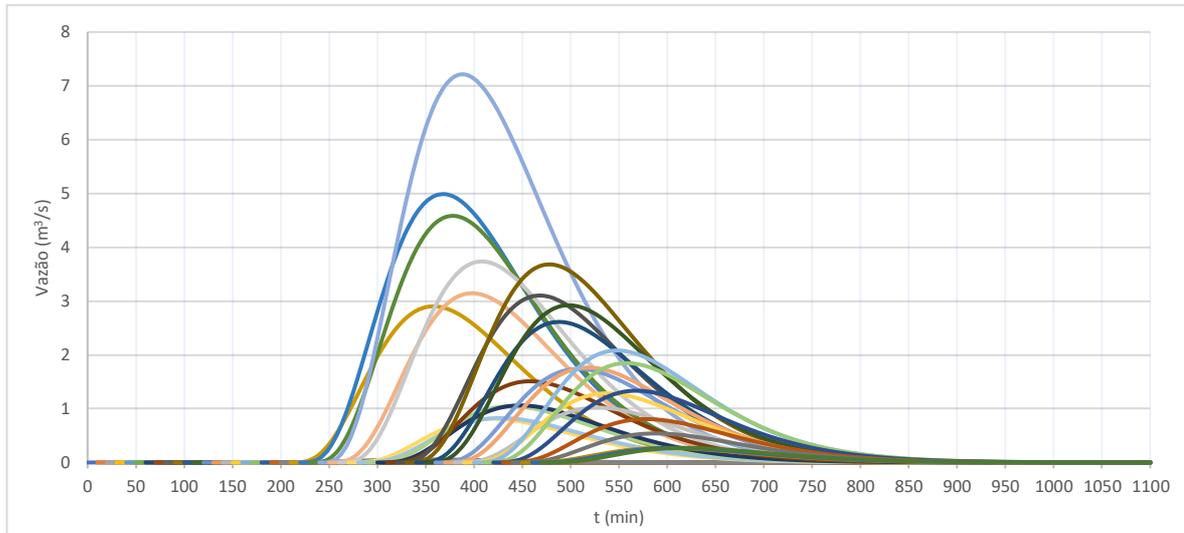
Como esperado, na Figura 24, observou-se o acréscimo na intensidade da chuva em relação ao evento de 2019, devido a esta precipitação ter um período de retorno superior ao do que ocorreu neste ano. Nos hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos (Figura 25), a maior vazão encontrada foi de 7,21 m³/s, enquanto que, no hidrograma total (Figura 26), a vazão de pico foi de 40,31 m³/s.

Figura 24 - Hietogramas das precipitações total e efetiva - TR 10 anos



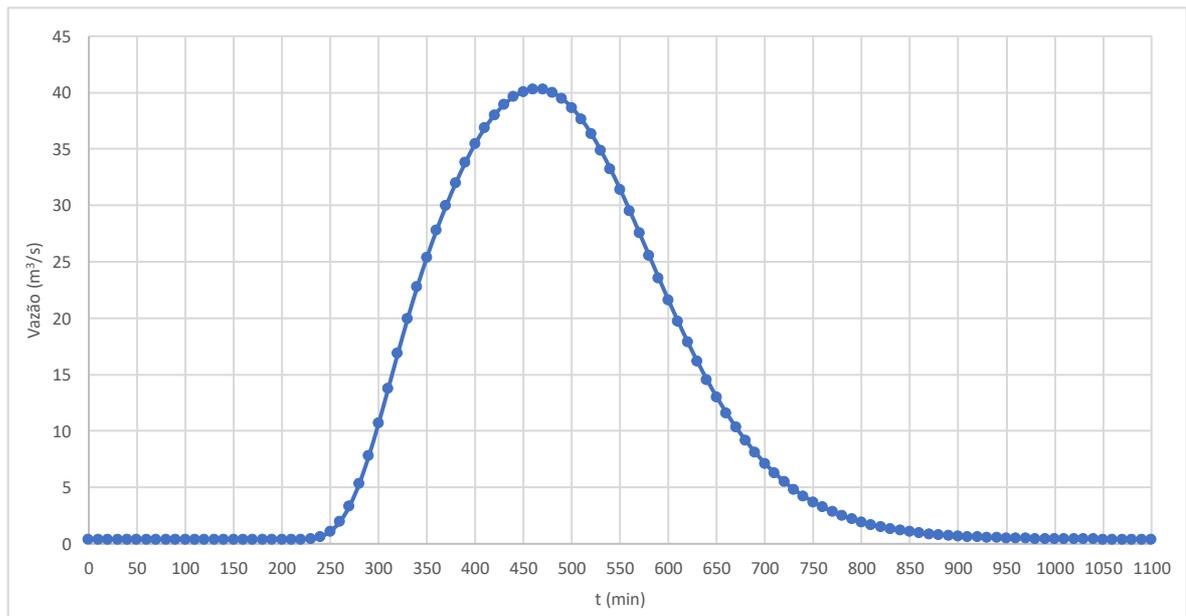
Fonte: Adaptado do INEMA, 2019.

Figura 25 - Hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos - TR 10 anos



Fonte: Autor, 2021.

Figura 26 - Hidrograma total após o processo de convolução - TR 10 anos

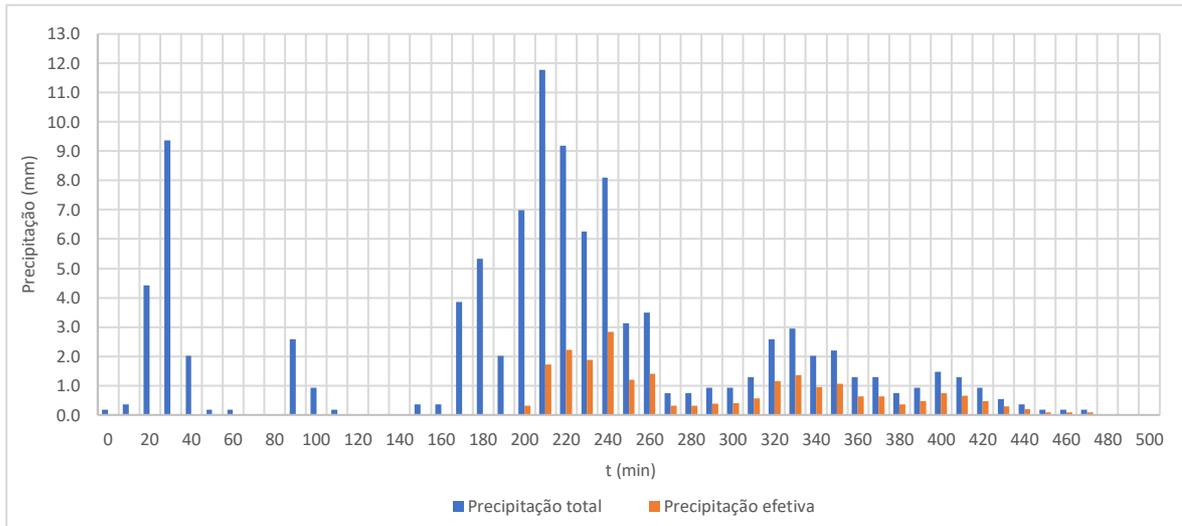


Fonte: Autor, 2021.

5.2.2.3 Período de retorno de 20 anos

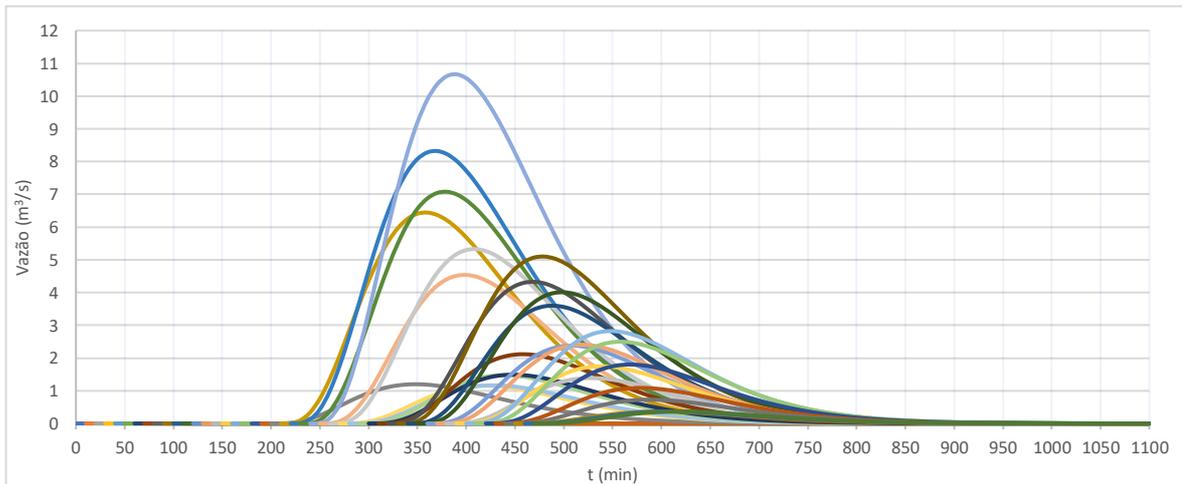
Como esperado, observou-se, na Figura 27, que houve acréscimo na intensidade da chuva e, conseqüentemente, os valores da precipitação efetiva também foram aumentados por conta da associação a um período de retorno superior. Nos hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos (Figura 28), a maior vazão encontrada nos intervalos foi de $10,66 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que, no hidrograma total (Figura 29), a vazão de pico foi de $59,72 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 27 - Hietogramas das precipitações total e efetiva - TR 20 anos



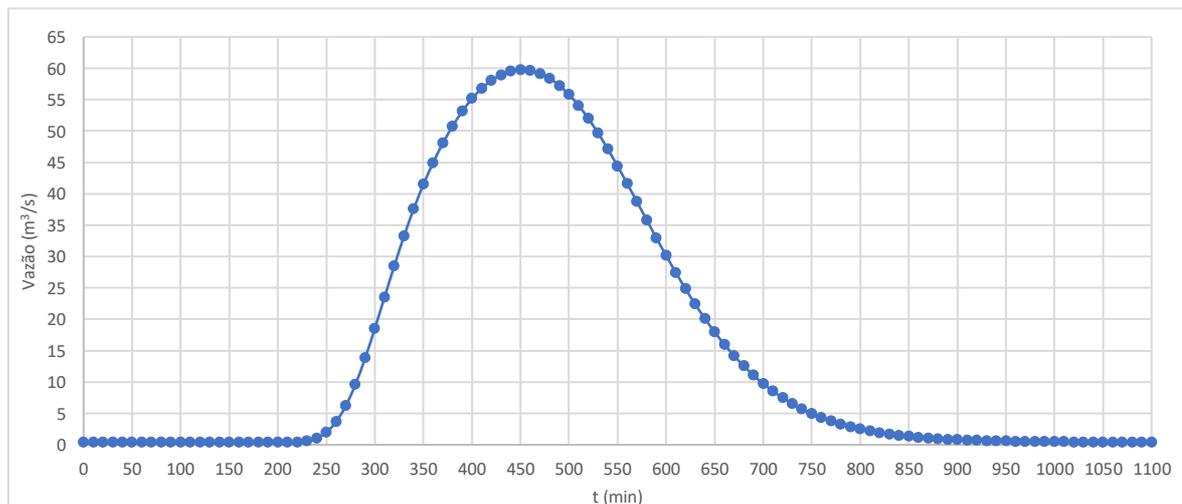
Fonte: Adaptado do INEMA, 2019.

Figura 28 - Hidrogramas para cada intervalo de 10 minutos - TR 20 anos



Fonte: Autor, 2021.

Figura 29 - Hidrograma total após o processo de convolução - TR 20 anos



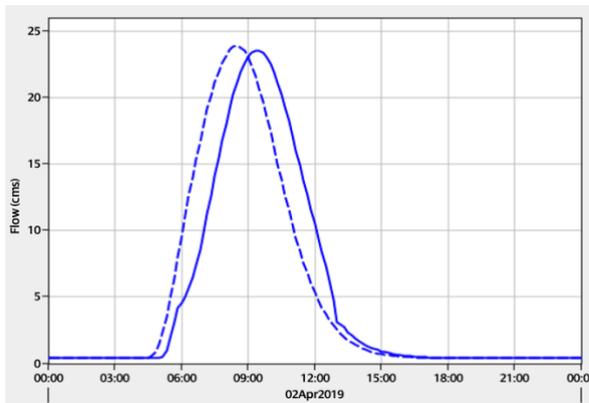
Fonte: Autor, 2021.

5.3 Propagações de ondas de cheia para eventos extremos de chuva

Para as simulações das propagações de ondas de cheia relacionadas ao evento de 2019, foram utilizados os dados de entrada no HEC-HMS apresentados na Quadro 07. Esta simulação foi a primeira a ser realizada, pois, este evento foi utilizado para a realização do ajuste do modelo hidrológico da bacia.

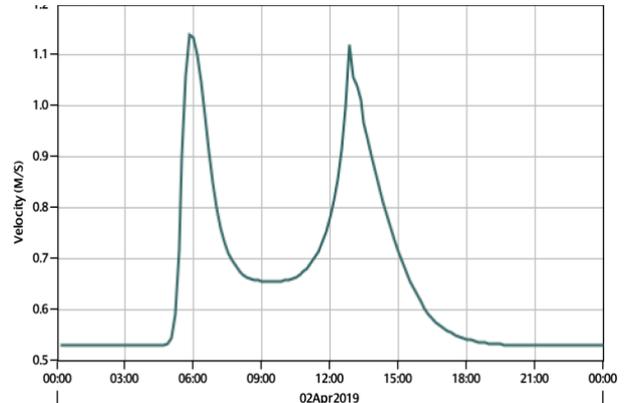
Com os ajustes realizados, foram obtidos os resultados das Figuras 30, 31 e 32:

Figura 30 - Hidrogramas de entrada e saída



Fonte: Autor, 2021.

Figura 31 - Gráfico da velocidade do escoamento



Fonte: Autor, 2021.

Figura 32 - Valores máximos das vazões de entrada e saída

Project: simulacao3 Simulation Run: 005 anos - novo			
Reach: Reach-1			
Start of Run:	02Apr.2019, 00:00	Basin Model:	Basin 1
End of Run:	03Apr.2019, 00:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	23Mei2021, 00:54:24	Control Specifications:	Control 1
Volume Units:		<input type="radio"/> MM	<input checked="" type="radio"/> 1000 M3
Computed Results			
Peak Inflow:	23,87 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow	02Apr.2019, 08:30
Peak Discharge:	23,54 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	02Apr.2019, 09:20
Inflow Volume:	425,62 (1000 M3)	Discharge Volume:	424,33 (1000 M3)

Fonte: Autor, 2021.

Foram encontrados os valores de 23,54 m³/s para a vazão de pico à justante e 0,65 m/s para a velocidade do escoamento neste momento. Observa-se que a defasagem da onda foi de 50 minutos e o amortecimento da vazão foi de apenas 1,38%. Provavelmente, deve-se ao fato de que o comprimento do trecho a ser propagado é muito curto (apenas 2,02km), dessa forma, não há fatores externos suficientes para que haja uma maior dissipação de energia.

Para as propagações das ondas de cheia referentes às precipitações com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos, foram encontrados os resultados do Quadro 10):

Quadro 10 - Resultados das propagações de ondas de cheia - TR 2, 10 e 20 anos

TR (anos)	Q _p de entrada (m ³ /s)	Q _p de saída (m ³ /s)	Amort. (%)	Veloc. (m/s)	Pico de entrada	Pico de saída	Def. (min)
2	5,61	5,56	0,89	1,06	09:00	09:50	50 min
10	40,31	39,86	1,12	0,64	08:10	09:00	50 min
20	59,72	59,14	1,00	0,66	08:00	08:50	50 min

Fonte: Autor, 2021.

Observou-se que em todos os gráficos dos hidrogramas de entrada e saída, os amortecimentos foram suaves, variando de 0,89% a 1,38%, e as velocidades também tiveram pouca variação, com exceção da simulação referente à precipitação com período de retorno de 2 anos. Além disso, percebeu-se que os horários das vazões de pico de entrada e saída são relacionados à magnitude do evento, já que quanto menor a vazão máxima, mais tarde aconteceu o evento.

Isto deve-se ao fato que, quanto maior o período de retorno associado a uma precipitação, maior a sua magnitude, logo, mais rápido a chuva é acumulada no solo e a sua precipitação efetiva contribui para o escoamento superficial. Logo, o pico deste hidrograma é atingido anteriormente em relação aos outros hidrogramas de precipitações com períodos de retorno menores.

5.4 Identificação de áreas suscetíveis a inundações

Após as simulações, foram coletados os dados de vazão de pico e a velocidade neste momento. Com o perfil da seção transversal do rio, foram obtidas as cotas máximas para cada precipitação analisada. Os resultados estão apresentados no Tabela 06:

Tabela 05 - Resultados do modelo para avaliação das áreas ribeirinhas

TR (anos)	Q _{max} (m ³ /s)	V (m/s)	A _T (m ²)	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	H _{fâmina}	L _{inund}
2	5,56	1,06	5,245	3,36	1,885	1,44	16,54
5	23,54	0,65	36,215	3,36	32,855	2,95	66,66
10	39,86	0,64	62,281	3,36	58,921	3,62	89,09
20	59,14	0,66	89,606	3,36	86,246	4,18	107,68

Fonte: Autor, 2021.

onde Q_{max} é a vazão de pico à jusante, V_{max} é a velocidade no momento da vazão de pico, A_T é a área total do perfil transversal, A_1 é a área do perfil do leito menor, A_2 é a área do perfil do leito maior (em m^2), $H_{lâmina}$ é a altura da lâmina d'água a partir do fundo da calha (em m) e L_{inund} é a estimativa do alagamento no leito maior (em m).

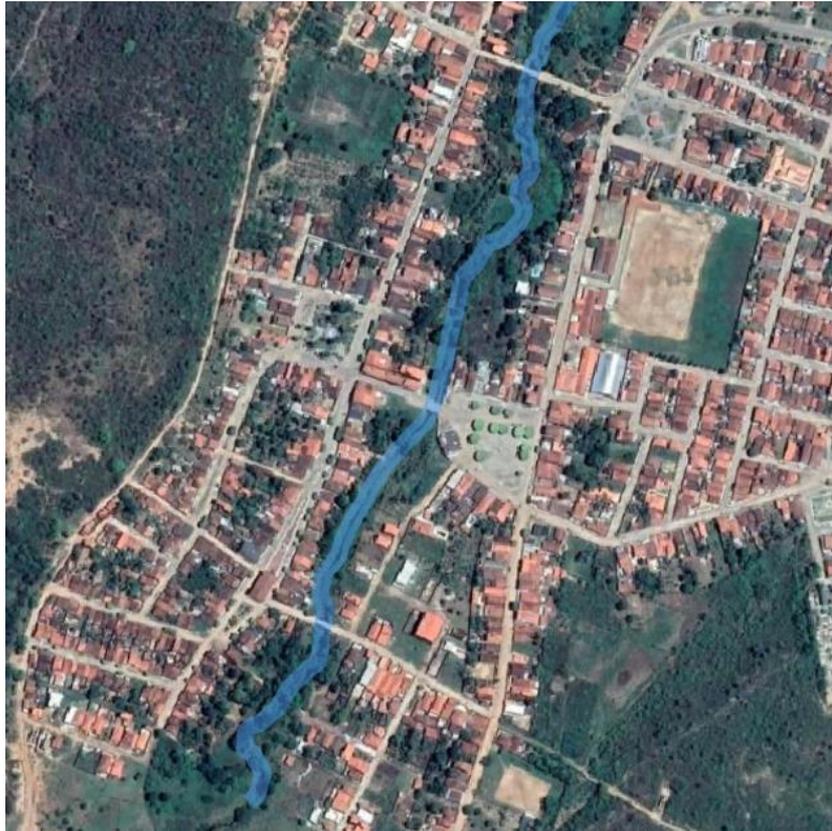
Para estes valores, foram realizadas análises no leito do rio de acordo com imagens de satélite obtidas pelo Google Maps, através da extensão *QuickMapServices* instalada no QGIS, e foi estabelecido que o mesmo perfil do rio seria replicado para todo o seu comprimento já que as curvas de nível geradas para o trecho não apresentaram boa representatividade em parcelas do perímetro urbano. Dessa forma, foram obtidos os resultados descritos no Quadro 11 com demonstração nas Figuras 33 a 40.

Quadro 11 - Prováveis danos para as regiões suscetíveis a inundações

TR	Prováveis danos
2 anos	Extravasamento do leito menor com lâmina d'água de 0,39m acima do mesmo. Provável invasão de alguns quintais com cercas simples mais próximos ao leito do rio. Representações nas Figuras 33 e 34.
5,1 anos	Lâmina d'água de 1,90m acima do leito menor. Invasão de residências mais próximas ao leito do rio, destruição de muros, derrubamento de árvores presentes no leito maior, destruição de culturas e plantações, morte de animais de pequeno e médio porte que estejam acorrentados ou em criadouros. Representações nas Figuras 35 e 36.
10 anos	Lâmina d'água de 2,57m acima do leito menor. Além dos riscos citados na categoria anterior, invasão da maioria das residências que estão na margem do leito do rio, riscos de danos às estruturas das residências, morte de animais de grande porte, destruição e obstrução de ruas, risco para humanos. Representações nas Figuras 37 e 38.
20 anos	Lâmina d'água de 3,13m acima do leito menor. Todos os prováveis danos das categorias anteriores, invasão de todas as residências que estão na margem do rio. Representações nas Figuras 39 e 40.

Fonte: Autor, 2021.

Figura 33 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 1 - TR 2 anos



Fonte: Adaptado do Google Maps, 2021.

Figura 34 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 2 - TR 2 anos



Fonte: Adaptado do Google Maps, 2021.

Figura 35 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 1 - TR 5,1 anos



Fonte: Adaptado do Google Maps, 2021.

Figura 36 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 2 - TR 5,1 anos



Fonte: Adaptado do Google Maps, 2021.

Figura 37 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 1 - TR 10 anos



Fonte: Adaptado do Google Maps, 2021.

Figura 38 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 2 - TR 10 anos



Fonte: Adaptado do Google Maps, 2021.

Figura 39 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 1 - TR 20 anos



Fonte: Adaptado do Google Maps, 2021.

Figura 40 - Provável inundação no perímetro urbano - Trecho 2 - TR 20 anos



Fonte: Adaptado do Google Maps, 2021.

Nas Figuras 41 a 44 podem ser identificadas algumas áreas suscetíveis a inundações no perímetro urbano do município. Percebe-se que as edificações foram construídas muito próximas ao leito menor, em que, provavelmente, até mesmo eventos com pequenos períodos de retorno possam atingir as mesmas.

Figura 41 - Residências próximas ao leito menor do rio



Fonte: Google Street, 2012.

Figura 42 - Plantações de banana inundadas pela cheia do rio



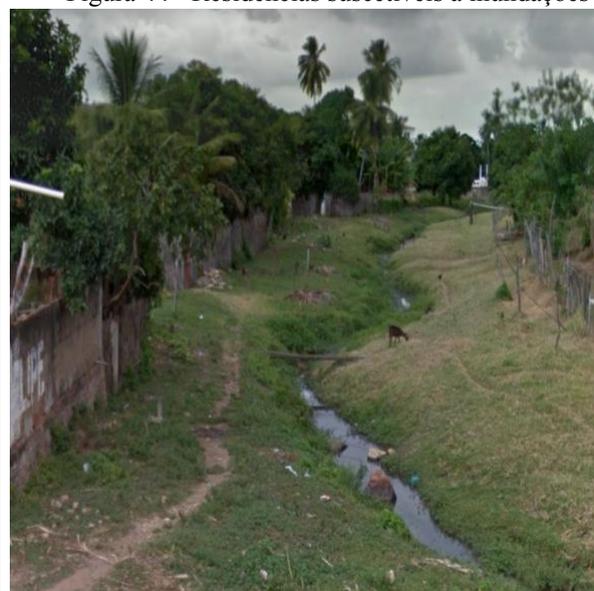
Fonte: Pablo Almeida, 2019.

Figura 43 - Residências atingidas pela inundação



Fonte: Flávio Cajado, 2015.

Figura 44 - Residências suscetíveis a inundações



Fonte: Google Street, 2012.

6. CONCLUSÃO

A análise e tratamento dos dados hidrológicos foram essenciais para a compreensão, não somente da magnitude da precipitação que ocorreu em 2019, mas também em relação às outras precipitações da série histórica. Foi constatado que o evento de 2019 teve um período de retorno de 5,1 anos e que o evento mais extremo dentre todos coletados pelas estações foi de 77,58 anos.

Ao estimar a vazão máxima gerada pela precipitação do ano de 2019, foi obtido o valor de 23,87 m³/s. Já para as precipitações com períodos de retorno de 2, 10 e 20 anos foram obtidas vazões máximas de 5,61 m³/s, 40,31 m³/s e 59,72 m³/s, respectivamente.

A partir das simulações das propagações de ondas de cheia, utilizando o software HEC-HMS, foi constatado que, como o trecho do rio no perímetro urbano é relativamente curto, não há amortecimento das vazões de forma significativa (de 0,89% a 1,38% de amortecimento), além disso, as ondas propagaram-se por todo o trecho em apenas 50 minutos. Logo, percebeu-se que os impactos causados pelas mesmas vão desde a montante até a jusante com, praticamente, o mesmo potencial de dano.

Como resultado do objetivo principal deste trabalho, foram representadas as regiões suscetíveis a inundações no perímetro urbano do município. As inundações poderão atingir lâminas d'água de 0,39 m, 1,90 m, 2,57 m e 3,13 m acima do leito menor para precipitações com períodos de retorno de 2, 5,1, 10 e 20 anos, respectivamente. Dessa forma, percebeu-se que até mesmo para precipitações com períodos de retorno de 2 anos, alguns danos já poderão ser causados às propriedades com limites mais próximos do leito menor. Para os períodos de retorno superiores a 5,1 anos (evento extremo de 2019), os danos já passam a ser mais catastróficos envolvendo perdas materiais.

Por fim, conclui-se que os resultados deste estudo podem servir como um referencial para o potencial de danos que as inundações podem causar no município, inclusive, alertar a população sobre os riscos que as mesmas podem estar expostas.

Além disso, a realização deste estudo foi possível devido a disponibilidade dos dados hidrológicos, dados estes que estão sem monitoramento na cidade desde novembro de 2020, impossibilitando não somente o aprofundamento de novos estudos, mas também, a implementação de quaisquer ferramentas de alerta que dependam deste monitoramento. Logo, faz-se um apelo para que as estações que coletam tais dados passem a ser monitoradas novamente para que a dinâmica hidrológica na região continue a ser analisada e compreendida.

Cabe mencionar que algumas restrições e dificuldades foram encontradas no desenvolvimento deste trabalho, como a grande quantidade de falhas nos dados de precipitação após o ano de 2000, modelos digitais de elevação com má representatividade no perímetro urbano, além da falta de registros nos órgãos públicos do município com relação a inundações que ocorreram anteriormente e poderiam servir como referencial para este estudo.

Com relação a trabalhos futuros, sugere-se a realização de estimativas das probabilidades de ocorrência a partir de outros métodos juntamente com a utilização de testes e análises para verificação do ajuste dos métodos utilizados. Sugere-se também a realização de estudos com a utilização de outras metodologias de propagação de ondas de cheia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Banco de Dados. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 02 mar. 2021.

ALVES, A. V. P., SANTOS, G. B. da S., MENEZES FILHO, F. C. M. de, & SANCHES, L. (2013). **Análise dos métodos de estimação para os parâmetros das distribuições de Gumbel e GEV em eventos de precipitações máximas na cidade de Cuiabá-MT** (D.O.I.: 10.5216/reec.v6i1.21635). *REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil*, 6(1).

ALVES, Geovane Junqueira. **Aplicabilidade do método cn-scs a uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos no sul de MG**. 2016. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

ANDRADE, Cecília Júlia da Silva. **Modelagem hidráulica e hidrológica para diagnóstico de áreas susceptíveis a inundações com limitações de dados fisiográficos e hidrometeorológicos: estudo de caso Guidoal-MG**. 2017. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

ARAÚJO, Paulo Victor do Nascimento. **Geotecnologias de alta precisão no mapeamento de georisco a inundações frente às mudanças climáticas**. 2020. 157f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

BARBOSA, A. R. 2015. **Apostila de Hidrologia Aplicada – Introdução**. UFOP. Disponível em: < http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17403/material/Cap2%20-%20Bacia%20Hidrografica_UFOP.pdf >. Acesso em: 10 mar 2021.

BOTELHO, R. G. M. **Bacias hidrográficas urbanas**. In: GUERRA, A. (org.). *Geomorfologia urbana*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

BRAZ, Adalto Moreira *et al.* Análise da diferença entre dados altimétricos em uma bacia hidrográfica através da comparação entre modelos digitais de elevação. *Ateliê Geográfico*, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 71-96, abr. 2018.

CENAD. Página da web. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/informacoes-uteis/centro-nacional-de-gerenciamento-de-riscos-e-desastres-cenad>>. Acesso em: 07 mai 2021.

CERA, L.; ALMEIDA DOS SANTOS, S.; ELY GRISOSTIMO, T.; ZAFANELI BENEDETTI, L.; FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO, W. **Coleta de informações sobre impactos negativos decorrentes de fenômenos de inundações e ações de conscientização buscando amenizar os problemas às populações que vivem em zonas ribeirinhas**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 6, n. 3, 12 fev. 2020.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015. 336p.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Caém**. Caém: CPRM, 2005. 14 p. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16845/Rel_Caém.pdf?sequence=1. Acesso em: 02 mar. 2021.

DENDÊ NA MOCHILA - Caém/BA - Episódio 043 - 21.05.2016 - 2ª Temporada. Direção de Matheus Boa Sorte. Caém: Tv Aratu, 2016. Son., color. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=jfJd1LrhJKo&t=1271s>. Acesso em: 10 maio 2021.

EMBRAPA. **Estimativa de água disponível dos solos do Brasil**. 2021. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode/%3Abrasil_ad_solos_v5. Acesso em: 16 mar. 2021.

FARIAS, Ariadne Silvia de. **Inundações urbanas em Francisco Beltrão/PR : riscos e vulnerabilidades socioambientais**. 2019. 274 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/66322>. Acesso em: 23 abr. 2021.

FARIAS JÚNIOR, José Edson Falcão de; BOTELHO, Rosangela Garrido Machado. **Análise comparativa do tempo de concentração: um estudo de caso na bacia do rio Cônego, município de Nova Friburgo/RJ**. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 19., 2011, Maceió. Abrhidro, 2011. p. 1-20. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/81/0b4c20f7e82170db2ceff1aa8a6a52ac_5a57d8c9a287545a525d05397b7d1450.pdf. Acesso em: 28 mar. 2021.

FERREIRA, Ximena Cardozo. **Inundações urbanas: propostas para uma gestão do risco com foco na prevenção de danos**. 2017. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Jurídica, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2017.

GOOGLE STREET. Página da web. Disponível em: < <https://www.google.com/maps> >. Acesso em: 12 mai. 2021.

HARTMANN, Marcelo; MOALA, Fernando A.; MENDONCA, Marco Aurélio. Estudo das precipitações máximas anuais em Presidente Prudente. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v.

26, n. 4, p. 561-568, Dec. 2011 Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862011000400006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 24 mai. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000400006>.

IBGE. **Censo Demográfico**. Rio de Janeiro: Ibge, 1955. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/67/cd_1950_v20_t1_ba.pdf. Acesso em: 19 abr. 2021.

IBGE. Banco de Dados (2010). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba/caem.html>>. Acesso em: 19 abr. 2021.

IBGE. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro: Ibge, 2018. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/6d4743b1a7387a2f8ede699273970d77.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2021.

IBGE. Banco de Dados (2020). Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

INEMA. Banco de Dados (2019). Disponível em: < <http://monitoramento.seia.ba.gov.br>>. Acesso em: 02 mar. 2021.

MENDONÇA, Ednaldo Araújo. **Análise da precipitação nas mesorregiões do estado de Pernambuco**. 2016. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

MIRANDA, Francis Martins. **Índice de susceptibilidade do meio físico a inundações como ferramenta para o planejamento urbano**. 2016. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MIRANDA, Carolina Teixeira da Silva *et al.* **Precipitação máxima diária anual e estimativa da equação de chuvas intensas do município de Divinópolis, MG, Brasil**. *Scientia Agraria*, Curitiba, v. 18, n. 4, p. 9-16, out. 2017.

Novais, M. S. (2020). **Análise do desastre hidrometeorológico ocorrido em dezembro de 2018 na cidade de Jacobina – BA..** *Geografia Ensino & Pesquisa*, 24, e27. doi:<https://doi.org/10.5902/2236499440721>

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de *et al.* **Análise da suscetibilidade a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS, Brasil.** *Geociências*, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 437-453, jun. 2018.

PAULINO, Paloma Fernandes. **Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação dos hidrogramas de cheia em bacias urbanas**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hídrica e Saneamento, Universidade Federal de Santa Catarina, São Carlos, Sp, 2014.

PEIXOTO, Filipe da Silva. Gestão Integrada dos Recursos Hídricos e a Problemática das Inundações Urbanas. **Geografia**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 187-206, fev. 2019. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/34545/24975>. Acesso em: 24 abr. 2021.

PINTO, E. J. de A. ; NAGHETTINI, M.; **Hidrologia In: Serviço Geológico do Brasil. Variáveis aleatórias contínuas: Distribuições e aplicações: Distribuição Normal**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Cap. 5, p. 127.

PORTELA, M. M. **Modelação Hidrológica**. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2006.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Paulo- Rima Artes e Textos, 2006. 540 p.

PROCHMANN, João Ricardo. **Análise espacial da susceptibilidade à inundações na bacia hidrográfica do córrego grande, Florianópolis – SC**. 2014. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

REIS, Patrícia Antunes dos. **Identificação de áreas vulneráveis as enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

RIGHI, Eléia. **metodologia para zoneamento de risco a inundações graduais**. 2016. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ROSIN, J. A. R. G. **Áreas de preservação permanente e as dinâmicas urbanas e socioambientais: avanços e desafios das políticas de proteção e recuperação aos mananciais**. 2016. 432 f. Tese (Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.

SCHUSTER, Raíza Cristóvão. **Desenvolvimento de um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão e propagação de vazão em reservatórios**. 2014. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SILVA, A. M. D.; MELLO, C. R. D.; **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

SILVA, M. M. G. T.; WEERAKOON, S. B.; HERATH, S. **Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC-HMS: Case study in the Kelani River Basi, Sri Lanka**. Journal of Hydrologic Engineering, v. 19, n. 4, p. 800-806, 2014.

SILVA, Ofélia Carneiro et al. Avaliação dos impactos causados pelas enchentes em regiões ribeirinhas na cidade de Boa Vista/RR. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, [S.l.], v. 3, n. 4, July 2017. ISSN 24477028. Disponível em: < <https://revista.ufr.br/rct/article/view/2537/2272>>. Acesso em: 14 mai. 2021.

TOMAZ, P. **Método de Muskingum-Cunge**. Livro Canais. Capítulo 29. 2008. Disponível em: < <http://pliniotomaz.com.br/livros-digitais/>> Acesso em: 06 abr de 2021.

TUCCI, C. E. M. (1998). **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade: ABRH: 680p.

TUCCI, C. **Gestão das Inundações Urbanas**. Porto Alegre, RS, 2005. 200 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: ABRH, 2009. 943 p.

TUCCI, C. E. (2014). Vazão máxima e hidrograma de projeto. Em C. E. Tucci, **Hidrologia: ciência e aplicação** (4a Edição ed., pp. 527- 572). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.

USACE – US Army Corps of Engineers. Disponível em: < <http://www.hec.usace.army.mil/>>. Acesso em: 04 mai 2021.

USBR. SCS – Soil Conservation Service, (1986), **National Engineering Handbook**, section 4, Hydrology, Rev. Ed., U.S.D.A., Washington D.C., U.S.A. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/researchreports.html>>. Acesso em: 03 mar 2021.

USGS. United States Geological Survey - **Earth Explorer**. 2021. Disponível em: < <https://earthexplorer.usgs.gov> >. Acesso em: 12 fev. 2021.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mcgraw Hill, 1975. 250p

YOGI, Fernando. **Parâmetros de estudo em vazão de projeto para renovação de outorga de barramento**. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sustentabilidade na Gestão Ambiental, Universidade Federa de São Carlos, Sorocaba, 2018. Disponível em: <http://www.ppgsga.ufscar.br/alunos/banco-de-dissertacoes/Dissertao_Verso_Final_Yogi.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2021.