



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA SUL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUIS PAULO RÊGO SANTOS

**MAPEAMENTO DE ÁREA SUSCETÍVEL À CHEIA UTILIZANDO MODELAGEM E
SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA: Área a jusante da Sub-Bacia PD14, Teresina/PI**

TERESINA/PI

2024

LUIS PAULO RÊGO SANTOS

MAPEAMENTO DE ÁREA SUSCETÍVEL À CHEIA UTILIZANDO MODELAGEM E
SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA: Área a jusante da Sub-Bacia PD14, Teresina/PI

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Orientador: Prof. Me. Israel de Oliveira Costa

TERESINA/PI

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Santos, Luis Paulo Rêgo

S237m Mapeamento de área suscetível à cheia utilizando modelagem e
simulação hidrológica: área a jusante da Sub- Bacia PD14, Teresina/PI
/ Luis Paulo Rêgo Santos. - 2024.
85 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Zona Sul, 2024.

Orientador: Prof. Me. Israel de Oliveira Costa

1. Engenharia civil. 2. Hidrologia aplicada. 3. Simulação hidrológica.
4. Drenagem pluvial. I. Título.

CDD - 624

Elaborado por Isabel dos Santos Lima CRB 3/1060

LUIS PAULO RÊGO SANTOS

MAPEAMENTO DE ÁREA SUSCETÍVEL À CHEIA UTILIZANDO MODELAGEM E
SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA: Área a jusante da Sub-Bacia PD14, Teresina/PI

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Israel de Oliveira Costa (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ailton Soares Freire
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Kelson De Sousa Leite
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

À minha família, amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre me deu apoio e nunca me criticaram pelas minhas escolhas, pelo contrário, às minhas filhas, Anna e Maria Eduarda, amo vocês, chegar em casa é sempre leve.

Aos meus amigos, não seria nada sem eles, aqueles que passo maior parte do dia, me dando força, apoio, ouvindo os desabafos, rindo, brigando...apenas amigos.

Quero agradecer também aos amigos antigos, que mesmo com a distância jamais deixaram que a linha minha tênue quebrasse, amizade de verdade vai além do tempo, Marcus, Karol, Sávio, Samuel, Mateus, jamais irei esquecer vocês. Um agradecimento ao meu mentor e amigo, Willian, nunca foi tão fácil trabalhar e ser amigo de uma pessoa, gentil, esforçado e acima de tudo, justo, exemplo de comprometimento e não menos importante, Rani, meu braço direito, sinto tanto orgulho da evolução e de como está crescendo. Hoje, jovem me vejo almejando aos poucos tudo que sonhei, o caminho que trilho não é fácil, mas vejo que o processo é mais importante do que a realização, o segredo é fazer o que gosta e aproveitar os detalhes, sempre com boas companhias e um gole de café, esse último não pode faltar.

Um agradecimento especial aos amigos que estão se formando comigo, em especial o Igor, exemplo de educação e gentileza, me sinto tão honrado com a amizade e os demais que, mesmo distante, às vezes, me orgulho dos passos que estão dando. Acredito que família é mais do que sangue, é também o vínculo que fazemos no decorrer da vida.

Por último, agradeço os professores, a todos aqueles que de forma simplória e dedicada souberam me passar cada ensinamento, seja na vida acadêmica ou já na vida pessoal.

Obrigado a todos que acreditam que o sucesso está logo ali, e o segredo é simples, fazer o que gosta, aproveitar o processo da melhor forma possível, ser gentil é uma benção, o resultado vem para todos, basta estar preparado.

Carpe diem.

Horácio (65 a.C. - 8 a.C.)

RESUMO

Este estudo tem como objetivo principal realizar o mapeamento de áreas suscetíveis a cheias na sub-bacia PD14, localizada em Teresina/PI, através da utilização de modelagem e simulação hidrológica utilizando o software HEC-HMS. A sub-bacia PD14 é uma área vulnerável a inundações devido à sua localização e características geomorfológicas. A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial para prever e mitigar os efeitos das cheias, fornecendo informações cruciais para o planejamento urbano e gestão de riscos. O HEC-HMS é um software amplamente utilizado para simulações hidrológicas, permitindo a representação detalhada dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. Neste estudo, serão utilizados dados topográficos, precipitação e vazão para validar o modelo hidrológico. Posteriormente, serão realizadas simulações a partir da determinação premissas hidrológicas para determinação das cotas de inundações, assim com as devidas vazões e tempos de pico. Os resultados esperados deste estudo contribuirão significativamente para a delimitação das áreas de risco na sub-bacia PD14, subsidiando ações de planejamento e gestão urbana voltadas para a redução dos impactos das cheias em Teresina/PI, incluindo a implementação de medidas de controle de enchentes, como a construção de sistemas de drenagem e contenção de águas pluviais pelos órgãos públicos.

Essas medidas são essenciais para proteger a população e a infraestrutura urbana contra os riscos associados às inundações, minimizando prejuízos materiais e possíveis impactos socioeconômicos.

A abordagem metodológica adotada neste estudo envolve a integração de dados geoespaciais e técnicas de modelagem hidrológica utilizando o software HEC-HMS, permitindo uma análise detalhada da dinâmica hidrológica da sub-bacia PD14. A validação do modelo é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos através da metodologia adotada nas simulações hidrológicas. Ademais, a utilização de ferramentas de geoprocessamento facilitará a visualização e interpretação dos resultados, possibilitando a identificação precisa das áreas de risco e a elaboração de mapas temáticos para subsidiar o planejamento e a tomada de decisão.

Palavras-chave: Hidrologia aplicada; Simulação hidrológica; Drenagem pluvial.

ABSTRACT

This study aims to map areas susceptible to flooding in the PD14 sub-basin, located in Teresina/PI, through the use of hydrological modeling and simulation using the HEC-HMS software. The PD14 sub-basin is a vulnerable area to floods due to its location and geomorphological characteristics. Hydrological modeling is an essential tool for predicting and mitigating the effects of floods, providing crucial information for urban planning and risk management. HEC-HMS is widely used software for hydrological simulations, allowing detailed representation of hydrological processes in a watershed. In this study, topographic, precipitation, and flow data will be used to validate the hydrological model. Subsequently, simulations will be conducted based on the determination of hydrological premises to establish flood levels, as well as the corresponding flows and peak times. The expected results of this study will significantly contribute to the delineation of risk areas in the PD14 sub-basin, supporting urban planning and management actions aimed at reducing the impacts of floods in Teresina/PI, including the implementation of flood control measures, such as the construction of drainage systems and stormwater retention by public agencies.

These measures are essential to protect the population and urban infrastructure against the risks associated with floods, minimizing material losses and possible socioeconomic impacts.

The methodological approach adopted in this study involves the integration of geospatial data and hydrological modeling techniques using HEC-HMS software, allowing a detailed analysis of the hydrological dynamics of the PD14 sub-basin. The validation of the model is crucial to ensure the reliability of the results obtained through the methodology used in the hydrological simulations. Moreover, the use of geoprocessing tools will facilitate the visualization and interpretation of the results, enabling the precise identification of risk areas and the creation of thematic maps to support planning and decision-making.

Keywords: Applied hydrology; Hydrological simulation; Rainwater drainage

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem da cheia do rio Parnaíba em 2009.....	21
Figura 2 - Valores de CN para bacias Urbanas e Sub-Urbanas.....	29
Figura 3 - Hidrograma unitário triangular pelo método SCS	30
Figura 4 – Sub-Bacia PD14, Teresina – Piauí	31
Figura 5 - Região de estudo e delimitação de região de descarga.....	32
Figura 6 - Área de estudo - Região de descarga	33
Figura 7 - Tipo de solo hidrológico (grupos)	38
Figura 8 - Parâmetro "Curva Número" do SCS.....	40
Figura 9 - Sub-Bacia PD14.....	41
Figura 10 - Sub-Bacia PD14 recortada.....	42
Figura 11 - Sub-Bacia PD14 - Classificação de áreas permeáveis.....	43
Figura 12 - Sub-Bacia PD14 – Área impermeável, Teresina – Piauí.....	44
Figura 13 - Modelo de Hietograma de Chuva com $Tr = 10$ anos	46
Figura 14 - Hietograma $Tr = 2$ = anos	48
Figura 15 - Hietograma $Tr = 5$ = anos	50
Figura 16 - Hietograma $Tr = 10$ anos	51
Figura 17 - Hietograma $Tr = 25$ anos	53
Figura 18 - Hietograma $Tr = 50$ = anos	54
Figura 19 - Hietograma $Tr = 100$ anos.....	56
Figura 20 - Interface do HEC-HMS	57
Figura 21 – Área de estudo e funcionamento da modelagem	58
Figura 22 - Dispositivos para configuração	58
Figura 23 - Lista de modelos configurados.....	59
Figura 24 - Configuração da Sub-bacia PD14.....	59
Figura 25 - Configuração do Reservatório	60
Figura 26 - Configuração do reservatório, Cota X Volume.....	61
Figura 27 - Configuração do Modelo meteorológico.....	61
Figura 28 - Configuração da precipitação no tempo	62
Figura 29 - Gráfico do hietograma gerado pelo HEC-HMS.....	63
Figura 30 - Dispositivo de extravasão do reservatório	64
Figura 31 - Configuração do dispositivo de extravasão	64
Figura 32 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com $Tr = 2$ anos.....	65
Figura 33 - Tabela resumo de teste em $1000m^3$ - $Tr = 2$ anos.....	65
Figura 34 - Tabela resumo de teste em milímetro - $Tr = 2$ anos.....	66
Figura 35 - Mancha de inundação - $Tr = 2$ anos	66
Figura 36 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com $Tr = 5$ anos.....	67
Figura 37 - Tabela resumo de teste em $1000m^3$ - $Tr = 5$ anos.....	67
Figura 38 - Tabela resumo de teste em milímetro - $Tr = 5$ anos.....	68
Figura 39 - Mancha de inundação - $Tr = 5$ anos	68
Figura 40 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com $Tr = 10$ anos.....	69
Figura 41 - Tabela resumo de teste em $1000m^3$ - $Tr = 10$ anos.....	69
Figura 42 - Tabela resumo de teste em milímetro - $Tr = 10$ anos.....	70
Figura 43 - Mancha de inundação - $Tr = 10$ = anos.....	70
Figura 44 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com $Tr = 25$ anos.....	71
Figura 45 - Tabela resumo de teste em $1000m^3$ - $Tr = 25$ anos.....	71

Figura 46 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 25 anos.....	72
Figura 47 - Mancha de inundação - Tr = 25 anos.....	72
Figura 48 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com Tr = 50 anos.....	73
Figura 49 - Tabela resumo de teste em 1000m ³ - Tr = 50 anos.....	73
Figura 50 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 50 anos.....	74
Figura 51 - Mancha de inundação - Tr = 50 anos.....	74
Figura 52 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com Tr = 100 anos.....	75
Figura 53 - Tabela resumo de teste em 1000m ³ - Tr = 100 anos	75
Figura 54 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 100 anos	76
Figura 55 - Mancha de inundação - Tr = 100 anos.....	76
Figura 56 - Gráficos Cota x Volume e Escoamento superficial com Tr = 5 anos para análise.....	77
Figura 57 - Sobreposição de manchas de inundações analisadas.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e Variáveis Hidrológicas	18
Tabela 2 - Fórmulas de tempo de concentração testados.....	35
Tabela 3 - Características das bacias hidrográficas utilizadas durante os estudos.....	36
Tabela 4 – Fórmulas de TC recomendadas	37
Tabela 5 - Cálculo de "Número Curva" - PD14.....	39
Tabela 6 – Dados fisiográficos – Sub-bacia PD14.....	45
Tabela 7 - Cálculo de Tempo de concentração (TC)	46
Tabela 8 - Chuva de projeto - Tr 2 = anos - Blocos alternados.....	47
Tabela 9 - Chuva de projeto - Tr 5 = anos - Blocos alternados.....	48
Tabela 10 - Chuva de projeto - Tr 10 = anos - Blocos alternados	50
Tabela 11 - Chuva de projeto - Tr 25 = anos - Blocos alternados.....	52
Tabela 12 - Chuva de projeto - Tr 50 = anos - Blocos alternados	53
Tabela 13 - Chuva de projeto - Tr = 100 anos - Blocos alternados	55
Tabela 14 - Parâmetros para cálculo de vazão de pico e Modelagem do escoamento	56
Tabela 15 - Resumo de resultados críticos das modelagens.....	78
Tabela 16 - Comparativo de resultados das manchas de inundações	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CN	<i>Curve Number</i>
Tr	Tempo de Retorno
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hidrologic Modeling System</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
TC	Tempo de Concentração
HUT	Hidrograma unitário Triangular
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
PDDRU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
PI	Piauí
LID's	<i>Low Impact Development</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ANA	Agência Nacional de Água
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
HSPF	<i>Hydrologic Simulation Program - Fortran</i>
CLM	<i>Community Land Model</i>
INCA	<i>Integrated Catchment Model</i>
SIG	Sistema integrado de Georreferenciamento
HEC-HAS	<i>Hydrologic Engineering Center - River Analysis System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

Δ Delta

Sumário

1	Introdução	14
2	Objetivo	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	Referencial teórico	17
3.1	Introdução à Hidrologia	17
3.1.1	Dados hidrológicos	17
3.2	Drenagem urbana	18
3.3	Cheias e seus impactos	19
3.4	Cenário histórico e atual, suscetibilidade à enchentes e alagamento em Teresina/PI	20
3.5	Modelo de previsão e mapeamento de áreas suscetíveis a cheia	22
3.6	Software HEC-HMS	22
3.7	Simulação hidrológica	23
3.8	Modelagem hidrológica	25
3.9	O método do Soil Conservation Service (SCS)	26
3.9.1	Vazão de projeto pelo método do Hidrograma Unitário Triangular (HUT) do Soil Conservation Service (SCS)	29
4	Procedimento metodológico	31
4.1	Região de Análise - Sub-bacia PD14	31
4.1.1	Delimitação da área de descarga	32
4.2	Metodologia	33
4.3	Coleta de dados	34
4.3.1	Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF)	34
4.3.2	Tempo de concentração (TC)	34
4.3.3	Curve Number (CN) pelo método SCS	37
4.3.4	Área Impermeável	40
4.3.4.1	Classificação	42
4.3.5	Dados Fisiográficos	44
4.3.6	Hietograma pelo método dos blocos alternados	45
4.4	Informações de entrada para modelagem no Software HEC-HMS	46
4.4.1	Tempo de concentração (TC)	46
4.4.2	Chuva de projeto pelo método dos blocos alternados utilizando Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Teresina/PI	47
4.4.2.1	Tempo de Retorno (Tr) 2 anos	47

4.4.2.1.1	Hietograma (Tr) 2 anos	48
4.4.2.2	Tempo de Retorno (Tr) 5 anos	48
4.4.2.2.1	Hietograma (Tr) 5 anos	50
4.4.2.3	Tempo de Retorno (Tr) 10 anos	50
4.4.2.3.1	Hietograma (Tr) 10 anos	51
4.4.2.4	Tempo de Retorno (Tr) 25 anos	52
4.4.2.4.1	Hietograma (Tr) 25 anos	53
4.4.2.5	Tempo de Retorno (Tr) 50 anos	53
4.4.2.5.1	Hietograma (Tr) 50 anos	54
4.4.2.6	Tempo de Retorno (Tr) 100 anos	55
4.4.2.6.1	Hietograma (Tr) 100 anos	56
4.4.3	Parâmetros para cálculo de vazão de pico e modelagem do escoamento	56
4.5	Simulação hidrológica no HEC-HMS	57
4.5.1	Interface do HEC-HMS	57
4.5.2	Configuração – Sub-bacia PD14	59
4.5.3	Configuração – Reservatório, área de estudo	60
5	Resultados	65
5.1	Precipitação com Tr = 2 anos	65
5.1.1	Mapa de Inundação	66
5.2	Precipitação com Tr = 5 anos	67
5.2.1	Mapa de inundação	68
5.3	Precipitação com Tr = 10 anos	69
5.3.1	Mapa de inundação	70
5.4	Precipitação com Tr = 25 anos	71
5.4.1	Mapa de inundação	72
5.5	Precipitação com Tr = 50 anos	73
5.5.1	Mapa de inundação	74
5.6	Precipitação com Tr = 100 anos	75
5.6.1	Mapa de inundação	76
5.7	Análise dos resultados	77
5.7.1	Análise dos gráficos	77
5.7.2	Análise das vazões, cotas de inundações e volume gerados no estudo	78
5.7.3	Análise dos mapas de alagamentos	79
6	Conclusões	80
6.1	Análise e conclusão	80

6.2	Aplicação do estudo na construção civil.....	80
6.3	Conclusão	81
–	Referências.....	82

1 Introdução

A falta de planejamento no uso e ocupação do solo além dos altos índices pluviométricos tem acarretado inundações e alagamentos mais intensos e frequentes nas cidades brasileiras. No Brasil uma parte considerável dos municípios não possuem projetos que visam minimizar ou eliminar os efeitos das inundações e/ou alagamentos (Santos, 2015).

Segundo Santos (2015) no Brasil existe uma cultura de impermeabilização, fazendo com que tornem as cidades mais fragilizadas durante eventos chuvosos, os cursos d'água não suportam todo o volume de água, as áreas alagadas irão se tornando maiores. Além de ter grande parte do município impermeabilizado, as bocas de lobo não conseguem suprir todo o volume de água da chuva, quando também não estão entupidas por lixo, proporcionado pela grande expansão urbana.

O volume de água que antes da urbanização era retido na vegetação e infiltrado no solo, passa a escoar rapidamente sobre superfícies impermeáveis e atinge rapidamente os canais de drenagem. Isso resulta em um grande aumento da vazão máxima dos rios, causando inundações urbanas e proporcionando alagamento, podendo levar a sinistros catastróficos (Canholi, 2015).

Segundo Rodrigues Neto (2019), as enchentes constituem um dos fenômenos que se revestem de consequências desastrosas, sobretudo para as populações ribeirinhas, mais suscetíveis ao risco.

A inundação e o alagamento urbana ocorre principalmente devido à natureza antropogênica (Jha *et al*, 2011), onde a rápida e não planejada urbanização altera o trajeto natural dos cursos d'água possibilitado também pela falta de dispositivos de drenagem ou a ineficiência deles. A urbanização aumenta a probabilidade de ocorrerem de alagamentos, cobrindo grandes partes de solo com casas, estradas e pavimentos, obstruindo canais e construindo drenos para garantir que a água flua para rios mais rapidamente do que seria em condições naturais (Fernandez & Lutz, 2010).

O perigo que leva ao risco de alagamento é definido como a probabilidade de ocorrência de um evento de certa magnitude em uma determinada área dentro de um período específico.

Diversas leis foram formuladas e medidas adotadas para proteger os atingidos por tais problemas, ao longo das últimas décadas, principalmente nos países mais desenvolvidos (Canholi, 2015).

A Lei Federal nº10.257 de 2001, aponta diretrizes gerais para a política urbana no Brasil, estabelecendo que o planejamento urbano deve ser realizado por meio de planos diretores, planos de desenvolvimento e planos setoriais. Para isso, entra em questão a criação do plano diretor (PD), que também é citado na mesma lei e exige sua elaboração para municípios com mais de 20 mil habitantes. Por meio de medidas de ordenamento acerca dos usos e ocupação do solo, busca-se também a preservação das bacias hidrográficas que dependem de como são esses usos e as atividades desenvolvidas em toda sua extensão (Santos, 2015). Nas áreas urbanizadas, a tendência é sua expansão e com ela vêm acompanhadas diversas alterações ambientais, inclusive mudanças no ciclo hidrológico.

Um Plano Diretor de Drenagem Urbana deve buscar planejar a distribuição da água no tempo e no espaço, com base na tendência de ocupação urbana compatibilizando esse desenvolvimento e a infra-estrutura para evitar prejuízos econômicos e ambientais, controlar a ocupação de áreas de risco de inundação através de restrições na áreas de alto risco e convivência com as enchentes nas áreas de baixo risco (Tucci, 1997).

Tucci (1997) diz que o Plano diretor de drenagem urbana - PDDrU tem como objetivo trabalhar a parte da infraestrutura urbana e correlacioná-las com o escoamento de águas pluviais e dos rios das áreas urbanas dos municípios, de forma que possa ter um objeto de gestão urbana.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDrU – THE) é um estudo que foi contratado pela prefeitura da cidade com o intuito de instituir diretrizes visando condições de sustentabilidade, drenagem e recursos naturais. Dessa forma é composto por 15 volumes, diagnosticando os principais problemas, causas e ações que devem ser instituídas para mitigá-los, entre medidas emergenciais, médio prazo e longo prazo, destacando-se a Sub-bacia PD14, alvo do presente estudo que está elencado como prioritária (Teresina, 2010). Vale ressaltar a Lei Complementar Nº 6105/2024, que altera dispositivos da Lei Complementar Nº 4724/2015, definindo medidas para regulação e controle dos impactos da drenagem urbana de novos empreendimentos e inundações ribeirinhas, na drenagem pluvial pública em Teresina/PI.

Nesse contexto, a utilização de modelos de previsão de áreas suscetíveis à cheia se torna uma ferramenta essencial para a tomada de decisões e a implementação de medidas mitigadoras. O software Hydrologic Modeling System

(Modelo de sistema hidrológico) - HEC-HMS é uma abordagem amplamente reconhecida e utilizada para o mapeamento de uma representação simplificada de sistema hidrológico que é utilizada para entender o comportamento da bacia hidrográfica, levando em consideração fatores como topografia, precipitação pluviométrica, características hidrológicas e morfologia do terreno.

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é realizar modelagem computacional utilizando modelo HEC-HMS em área à jusante da sub-bacia PD14 em Teresina/PI, tomando como referência a Lei Complementar Nº 6105/2024, que no parágrafo terceiro aponta que se deve utilizar períodos de retorno de dois anos para empreendimentos residenciais, de interesse social e preservação ambiental, cinco anos para empreendimentos comerciais, de serviços e industriais e dez anos para obras de infraestruturas. Como parâmetro de estudo, também será tomado como base os tempos de retorno de vinte e cinco, cinquenta e cem anos.

Por meio da aplicação desse modelo, pretende-se obter informações sobre as zonas de risco e as áreas suscetíveis à cheia que possam ser utilizados para futuros estudos de vulnerabilidade à enchentes na cidade, podendo assim otimizar a locação de obras hidráulicas, civis e métodos não destrutivos, visando mitigar os impactos gerados por esses fenômenos que são agravados pela impermeabilização do solo, crescimento populacional desordenado, despejo inadequado de resíduos sólidos e subdimensionamento de dispositivos de drenagem urbana.

2 Objetivo

2.1 Objetivo geral

Este estudo gerará modelos hidrológicos que auxiliarão no diagnóstico dos riscos de eventos de inundação e alagamento na região proposta, podendo ser utilizados para a tomada de decisões relacionadas à ocupação urbana e obras de infraestruturas.

2.2 Objetivos específicos

Para a realização desse objetivo geral, foram definidas algumas metas para este trabalho, são eles:

- Avaliar os hidrogramas gerados com os diversos tempo de retorno durante a modelagem no HEC-HMS;
- Simular diferentes cenários de precipitação e analisar os efeitos resultantes do escoamento superficial na área suscetível a alagamento;
- Validar a metodologia abordada e gerar mapas de risco de alagamento para a área de estudo com base nos resultados da simulação.

3 Referencial teórico

3.1 Introdução à Hidrologia

A Hidrologia é a ciência que estuda as águas da Terra, sua formação, circulação, distribuição, suas propriedades físico-químicas e suas interações com os seres vivos. A Hidrologia aplicada tem como objetivo principal estabelecer as relações que determinam as variabilidades espacial, temporal e geográfica dos recursos hídricos, para assegurar a qualidade do planejamento, projeto e operação de estruturas e sistemas hidráulicos (Sperling & Naghettini, 2007).

Dados meteorológicos, por exemplo, são aplicados em pequenas bacias hidrológicas para evidenciar com precisão informações de precipitações, variando em escala espacial e temporal.

A aplicação na engenharia é ampla e corriqueiramente apresentam-se estudos que utilizam de previsões de precipitações e suas vazões de acordo com os tempos de retornos sobre uma área de estudo conforme o estudo desenvolvido por (Sousa, *et al.* (2021) que aplica modelagem hidrológica para determinar a utilização de medidas de baixo impacto (LID's) em determinada área.

Além da utilização especificamente pela engenharia, modelos de conversão de chuva-vazão podem fornecer dados sobre a disponibilidade de água em diferentes etapas do ciclo hidrológico, que os torna uma ferramenta extremamente útil em qualquer tarefa de gestão de recursos hídricos.

3.1.1 Dados hidrológicos

É necessário coletar informações fundamentais que ocorrem ao longo do tempo e do espaço. As respostas para diversos problemas de hidrologia aplicada serão

exatas quanto mais longos e precisos forem os registros de dados hidrológicos (Sperling & Naghettini, 2007).

Atualmente, no Brasil, as principais instituições produtoras de informações e dados hidrométricos e hidrometeorológicos são: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cuja é operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de Água (ANA), entre outras. Algumas características e variações hidrológicas mais corriqueiras medidas encontram-se listados na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Características e Variáveis Hidrológicas

Variáveis	Característica	Unidade
Precipitação	Altura	mm, cm
	Intensidade	mm/h
	Duração	h, min
Evaporação/ETP	Intensidade	mm/dia, mm/mês
Infiltração	Intensidade	mm/h
	Altura	mm, cm
Escoamento superficial	Vazão	l/s, m ³ /s
	Volume	m ³ , (m ³ /s)
	Altura equivalente (Deflúvio)	mm ou cm sobre área
Escoamento subterrâneo	Vazão	l/min, l/h, m ³ /dia
	Volume	m ³

Fonte: Autor (2024)

3.2 Drenagem urbana

A maioria das cidades no Brasil têm sofrido com os problemas de alagamentos, inundação, cheia etc., embora seja causado pela conjunção de vários fatores, pode-se destacar principalmente dois: a ocupação desordenada das áreas de escoamento natural das águas pluviais e a inexistência de um sistema de drenagem urbana que os evite (Hernandez & Szigethy, 2021).

A drenagem urbana se torna um dos desafios prementes para todas as cidades do mundo. De acordo com o crescimento e o desenvolvimento urbano a água pluvial eficiente torna-se fundamental para a segurança, a saúde pública e a sustentabilidade ambiental. Dada a interação do ambiente construído e do ciclo natural da água, uma

série de questões surge, que exigem abordagens inovadoras e integradas. Com o crescimento e o desenvolvimento urbano, o manejo adequado da água pluvial se torna crucial para a segurança, a saúde pública e a sustentabilidade ambiental. Conforme a integração do ambiente construído e do ciclo natural da água, uma série de questões surgem, exigindo abordagens inovadoras e integradas.

A Lei no 11.445/2007 conceitua drenagem e manejo das águas pluviais urbanas como o conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas

A hidrologia é uma disciplina indispensável para o planejamento, projeto e operação de estruturas que queiram aproveitar a água como um recurso ou minimizar os efeitos de seu excesso ou escassez.

Para realizar atividades como abastecimento urbano, irrigação, geração de energia e navegação fluvial, é necessário medir diversas variáveis do ciclo hidrológico, bem como suas variações, a fim de determinar a vazão do curso d'água para fins de projeto e operação das estruturas hidráulicas envolvidas. As obras de alteração do regime hidrológico, como os reservatórios de acumulação, e as estruturas de controle e drenagem de enchentes - diques, muros de contenção, bueiros e vertedores - são exemplos de medidas necessárias para amenizar a escassez ou o excesso de água que dependem diretamente de estudos hidrológicos. (Sperling & Naghettini, 2007).

Nesses termos, podemos considerar que o sistema de drenagem básico de uma cidade deve se estruturar na junção entre todos os aspectos legais e técnicos, além das dimensões econômicas, sociais, ambientais e institucionais e, naturalmente, uma composição física mínima: pavimentação de ruas, sarjetas e guias, bocas de lobo, galerias de drenagem e valas. Vale ressaltar que todos esses componentes devem estar interligados e funcionando ou, do contrário, haverá muitas chances de falha no sistema de drenagem (Tucci & Bertoni, 2003). Além desses dispositivos as características das bacias hidrográficas possuem papel primordial no processo de drenagem.

3.3 Cheias e seus impactos

As mudanças climáticas globais e a rápida urbanização, impulsionadas

principalmente por atividades antrópicas, levam à vulnerabilidade das inundações urbanas e à incerteza na gestão sustentável das águas pluviais.

Sobre as zonas de risco e as áreas vulneráveis a enchentes, as alterações climáticas e as atividades humanas para o desenvolvimento urbano aumentaram a probabilidade de eventos extremos de precipitação intensa que desencadeiam inundações (Zhu, Li, Feng, & Zhang, 2023).

É de suma importância a distinção entre enchente e inundação, enchentes são o aumento temporário do canal de drenagem, mas sem transbordar e afetar as áreas marginais. A inundação é o transbordamento do canal, afetando as áreas marginais.

De acordo com a Política Nacional de Defesa Civil (Brasil, 2007) existem diversos tipos de inundação:

1. Inundações repentinas, bruscas ou enxurradas: Ocorrem em regiões montanhosas com muita inclinação e vales, onde a água da chuva pode arrastar terra e vegetação por causa dos deslizamentos nas margens do rio. As chuvas fortes e moderadas, mas contínuas também podem ocasionar inundações repentinas, que ocorrem quando o solo tem sua capacidade de infiltração ineficiente.
2. Inundação lenta ou de planície: Nas enchentes, as águas do curso d'água se elevam devagar e de forma previsível, elas se mantêm em situação de cheia por um período, e em seguida, escoam-se. Essas inundações normalmente são cíclicas.
3. Inundações em cidades ou alagamentos: Ocorrem a partir de águas acumuladas das ruas e perímetro urbano. São ocasionados por sistemas de drenagem deficientes, extravasa água por vários fatores.

3.4 Cenário histórico e atual, suscetibilidade à enchentes e alagamento em Teresina/PI

A Bacia do Rio Parnaíba é a segunda maior bacia hidrográfica do nordeste brasileiro e possui a rede hidrológica mais densa da região. Possui um sistema aquífero de importância ambiental e socioeconômica que é alvo de ação do governo federal, traduzindo-se na formulação de importantes instrumentos de desenvolvimento (Codevasf, 2016).

Em 1985 foi registrado o maior evento de cheia na região, ficando a 37cm de inundar a avenida Maranhão, com a coincidência de grandes vazões de forma

concomitante no rio Parnaíba. Tal evento provocou extensas inundações na cidade, especialmente na região de confluência, dada a existência de uma zona carente de diques nas margens do rio Poti, de acordo com o estudo realizado pela SEMPLAN (2018), estimou-se que a enchente que causou a inundação em 1985 representou uma precipitação com tempo de retorno de 100 anos. Ainda em 2009, tal cheia do Rio Parnaíba fora novamente notícia nos jornais Teresinenses, como informado em CidadeVerde (2009) *“o leito do rio Parnaíba irá subir para 6,50cm no domingo, ficando a 37 centímetros de transbordar na avenida Maranhão. A Chesf informou ainda que essa aferição só foi registrada na enchente de 1985”*.

Figura 1 - Imagem da cheia do rio Parnaíba em 2009



Fonte: Cidade Verde (2009)

A cheia na Bacia do Rio Parnaíba é um fenômeno natural que faz parte da dinâmica fluvial (Semplan, 2018). As cheias que ocorreram em Teresina/PI tiveram sua situação agravada pela confluência do rio Poti no rio Parnaíba, produzindo uma interação mútua no escoamento dos dois cursos de água (Souza et al 2018). O reflexo dessa interação é verificado através de uma curva no encontro dos dois rios, impondo relações adversas entre níveis de água e vazões ao longo de todo o trecho urbano da cidade. A vazão máxima em Teresina/PI, no rio Parnaíba são de 3.000,00 m³/s, ou seja, acima desse valor temos inundação na cidade. Mas devido ao efeito de remanso, para vazões inferiores, podemos ter cotas maiores e consequentemente inundação

(Semplan, 2018).

O processo de alagamento proporcionado pelo período chuvoso em Teresina causa transtornos no período com maior incidência de precipitação (Teresina, 2019).

3.5 Modelo de previsão e mapeamento de áreas suscetíveis a cheia

Modelos hidráulicos de Bacias hidrográficas de inundação podem ser usadas para gerar previsões da evolução temporal e espacial do tempo de alagamento, previsão de enchente, extensão da inundação e velocidade do escoamento superficial. Tais resultados, combinados com a análise do impacto socioeconômico, podem fornecer informações para melhorar a eficácia dos alertas de risco de inundação (Rudorff, 2015)

Os mapas de inundação podem ser de dois tipos: mapas de planejamento e mapas de alertas, retratando áreas atingidas por cheias de tempos de retorno escolhidos e informando em pontos de controle (esquinas, ruas etc.) o nível da régua da estação fluviométrica associada aos eventos de inundação local respectivamente (Tucci & Benedito, 2006).

O mapa de alerta de enchentes permite o monitoramento e o comportamento das cheias, com base nas observações da população em diferentes partes da cidade e quando combinado com um sistema de previsão de nível utilizável pelos órgãos responsáveis como uma ferramenta para o planejamento de ações visando minimizar os danos causados pelo evento.

3.6 Software HEC-HMS

Durante as últimas décadas, a modelagem hidrológica se tornou uma ferramenta essencial para compreender e prever o comportamento das águas superficiais em diversas bacias hidrográficas. Dentro desse vasto campo, o Modelo HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) surge como uma das ferramentas mais requisitadas e respeitadas. Desde sua concepção até os últimos avanços, essa ferramenta tem sido uma fonte constante de aprendizado e descoberta para os especialistas e estudiosos da área.

Para a modelagem hidrodinâmica deste projeto foi empregado o software HEC-HMS, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (Centro de engenharia

hidrológica) - HEC, uma instituição ligada ao *Institute for Water Resources do US Army Corps of Engineers* (Instituto de Recursos Hídricos do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA). O Sistema de Modelagem Hidrológica (HEC-HMS) foi projetado para simular os processos hidrológicos completos de sistemas dendríticos de bacias hidrográficas. O software inclui muitos procedimentos tradicionais de análise hidrológica, como infiltração de eventos, hidrogramas unitários e roteamento hidrológico. O HEC-HMS também inclui procedimentos necessários para simulação contínua, incluindo evapotranspiração, degelo e contabilização da umidade do solo.

Ao longo dos anos, o HEC-HMS tem sido usado em uma grande variedade de estudos e projetos relacionados à gestão de recursos hídricos, prevenção de enchentes, planejamento de bacias hidrográficas e avaliação de impactos ambientais. De acordo com Chang, *et al.* (2018) sua capacidade de simular eventos hidrológicos em tempo real e sua interação com outros softwares de modelagem fazem dele uma opção popular entre os profissionais que lidam com a gestão de águas superficiais.

A adaptabilidade do HEC-HMS é um dos aspectos mais significativos do HEC-HMS. De acordo com Gupta, *et al.* (2020) o modelo pode ser ajustado e validado com base em informações observacionais e meteorológicas locais, permitindo uma representação precisa dos processos hidrológicos de cada região. Isso torna o HEC-HMS uma ferramenta útil não somente em ambientes urbanos, mas também em áreas rurais e em desenvolvimento, onde a gestão integrada de recursos hídricos é crucial para o desenvolvimento sustentável.

3.7 Simulação hidrológica

A simulação hidrológica é uma ferramenta indispensável no estudo e na gestão dos recursos hídricos, permitindo compreender e prever os fluxos de água em diferentes ambientes naturais e urbanos. Nos últimos anos, houveram progressos significativos nesse campo, impulsionados pela criação de modelos computacionais mais avançados e pela integração de informações de alta qualidade.

Desde meados dos anos 2010, houve um aumento significativo na disponibilidade de informações espaciais e temporais para alimentar os modelos hidrológicos. Com o avanço da tecnologia de sensoriamento remoto e a expansão das redes de monitoramento, os pesquisadores agora têm acesso a uma quantidade sem precedentes de dados sobre precipitação, evaporação, uso do solo e características

topográficas. Esses dados são fundamentais para calibrar e confirmar os modelos hidrológicos, aumentando sua precisão e confiabilidade.

Um dos marcos relevantes dessa trajetória foi o desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos, que permitem representar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. Esses modelos, tais como o *Soil and Water Assessment Tool* (Ferramenta de avaliação de solo e água) - SWAT e o *Hydrological Simulation Program - Fortran* (Programa de Simulação Hidrológica) - HSPF, têm sido amplamente empregados para avaliar os efeitos das mudanças climáticas, do uso do solo e das práticas de manejo na disponibilidade de água e na qualidade dos recursos hídricos (Chaplot, Meddi, Boulet, & Cerdan, 2015), outros estudos que também foram desenvolvidos modelos hidrológicos que preveem a utilização de dispositivos *Low Impact Development* (Desenvolvimento de Baixo impacto) - LID's utilizando modelo hidrológico *Storm Water Management Model* (Modelo de Gestão de águas Pluviais) – SWMM (Sá e et al., 2022), (Sousa e et al., 2021).

A simulação hidrológica tem se tornado cada vez mais presente nas abordagens de modelagem de sistemas terrestres, com o objetivo de compreender as complexas interações entre o ciclo da água, o ciclo do carbono e o ciclo dos nutrientes. Os modelos mais recentes, como o *Community Land Model* (Modelo de terra comunitária) - CLM e o *Integrated Catchment Model* (Modelo integrado de captação) - INCA, permitem simular não apenas os fluxos de água, mas também os processos biogeoquímicos que ocorrem nos ecossistemas tanto terrestres quanto aquáticos (Arnold, et al., 2019).

De acordo com Wu et al. (2020) simulação hidrológica tem sido crucial para a gestão de recursos hídricos em escala local e regional. Modelos hidrológicos integrados a sistemas de apoio à decisão permitem analisar cenários de uso da terra, elaborar planos de gestão de bacias hidrográficas e prever os efeitos de eventos extremos, como secas e inundações. Essas ferramentas são fundamentais para orientar políticas públicas e práticas de uso racional dos recursos hídricos. No entanto, apesar dos avanços significativos, a simulação hidrológica enfrenta problemas relevantes que precisam ser superados. Os limites dos modelos computacionais ainda impedem a obtenção de previsões precisas e confiáveis. Ademais, a crescente demanda por simulações em alta resolução e em tempo real requer a criação de técnicas computacionais mais eficientes e escaláveis (Zhu, et al., 2019).

Ao longo dos anos, espera-se que a simulação hidrológica avance, impulsionada pelo desenvolvimento de novas técnicas de modelagem, pelo aprimoramento da qualidade dos dados e pela integração de abordagens interdisciplinares. A simulação hidrológica continuará desempenhando um papel crucial na compreensão e gestão dos recursos hídricos, contribuindo para um futuro mais sustentável e resiliente.

3.8 Modelagem hidrológica

A água é essencial para a existência. Em seu ciclo contínuo, ela percorre os continentes, alimentando rios, abastecendo reservatórios e sustentando a vida em todos os seus aspectos. Contudo, compreender e prever o comportamento dos fluxos hídricos é uma tarefa difícil, que requer recursos e técnicas avançadas. A modelagem hidrológica é uma técnica arrojada que nos proporciona examinar os complexos procedimentos que moldam o movimento da água na natureza.

Desde os primórdios da civilização, os humanos têm procurado compreender e controlar os padrões de fluxo da água. Entretanto, somente nas últimas décadas os progressos na tecnologia e na ciência permitiram-nos simular esses procedimentos com precisão incomparável. Como apontado por Gupta H. V. (2016) "*A modelagem hidrológica é uma ferramenta indispensável para prever inundações, administrar recursos hídricos e minimizar os impactos das mudanças climáticas.*"

A modelagem hidrológica é uma disciplina interdisciplinar que une princípios da hidrologia, meteorologia, geografia e ciência da computação para criar representações matemáticas dos sistemas hidrológicos. Esses modelos podem variar em complexidade, indo de modelos simples baseados em equações empíricas até modelos mais complexos que incorporam dados espaciais e temporais mais detalhados. Como apontado por Beven (2015), a modelagem hidrológica é uma arte e uma ciência, requerendo não apenas conhecimento técnico, mas também intuição e experiência para interpretar os resultados, é uma ferramenta essencial na base da gestão dos recursos hídricos e do planejamento urbano, ao permitir a compreensão e a minimização dos efeitos das inundações. Nos últimos anos, os esforços internacionais levaram ao desenvolvimento desta ferramenta, permitindo obter valiosas informações sobre os padrões de fluxo de água e, assim, reagir mais eficazmente às condições meteorológicas extremas.

Desde as primeiras tentativas de entender os sistemas hidrológicos até os modelos computacionais avançados de hoje, a modelagem hidrológica tem percorrido um longo caminho. De acordo com Gupta *et al.* (2015), a modelagem hidrológica evoluiu de abordagens simplificadas para simulações mais sofisticadas, incluindo uma variedade maior de processos físicos e aspectos espaciais. Ao longo dos anos, diversos simuladores hidrológicos foram criados para simular as condições de escoamento em bacias hidrográficas. Segundo Li *et al.* (2018), modelos baseados em sistemas de informação geográfica (SIG) têm sido bastante usados para analisar a distribuição espacial dos recursos hídricos e identificar áreas de risco de inundação.

A previsão de inundações é um dos principais propósitos da modelagem hidrológica. Com a frequência e intensidade das chuvas aumentando devido às mudanças climáticas, a capacidade de antecipar e minimizar os riscos de inundações se tornou crucial. Modelos hidrológicos, como o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), têm sido amplamente usados para prever o comportamento de rios e canais durante eventos extremos de precipitação (Thakur, Singh, & Ekanthalu, 2016).

3.9 O método do Soil Conservation Service (SCS)

O método do *Soil Conservation Service* (SCS) é um dos mais populares métodos de transformação chuva-vazão usados pelo meio técnico nacional (Nascimento, et al., 2011) e será a base do estudo proposto, como dados de entrada para rodar a modelagem no programa HEC-HMS.

De acordo com o *Natural Resources Conservation Service* (Serviço de conservação natural) - NRCS (2004), antiga *Soil Conservation Service* (Serviço de conservação do solo) – SCS, este método surgiu de um grande esforço de pesquisa de campo realizado na primeira metade do século XX para melhorar as ferramentas de planejamento de pequenas bacias hidrográficas rurais, em geral não monitoradas, dos Estados Unidos.

A popularidade do método do SCS é atribuída à facilidade de aplicação nas condições do território brasileiro, as quais tem-se acesso a dados de precipitação e características físicas das bacias hidrográficas. É importante ressaltar que a popularidade do método, deu-se após a popularização de programa para obtenção de imagens aéreas recentes disponíveis gratuitamente na internet, que permitiram a

determinação de parâmetros relacionados ao uso e ocupação do solo com relativa simplicidade (Nascimento, *et al.*, 2011).

O método do SCS teve sua origem no estudo de Mockus (1949) *apud* NRCS, (2004), no qual foram examinadas relações entre a chuva e vazão total, que evidenciavam um padrão côncavo e, em alguns eventos, não havia a presença de escoamento superficial. Inicialmente, assumindo que não havia perdas iniciais relacionadas à interceptação, armazenamento ou infiltração, logo, foi estabelecido que (Nascimento, *et al.*, 2011):

$$\frac{Q}{P} = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Onde, F é armazenamento (mm), S é o potencial de armazenamento (mm), Q é a chuva efetiva e P é chuva total (mm).

Levando em consideração que há perdas por interpretação, armazenamento ou infiltração denominadas de abstração inicial (I_a), esse valor deverá ser subtraído da chuva total antes da transformação em chuva efetiva, então,

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S - I_a} \quad (2)$$

Porém, pela equação de continuidade,

$$Q = (P - I_a) - F \quad (3)$$

Substituindo-se (3) em (2), tem-se, que:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (4)$$

Que é a influência entre chuva e vazão frisado pelo método SCS considerando a abstração inicial.

Como aponta o NRCS (2004), a abstração inicial pode ser obtida analisando eventos de chuva-vazão em pequenas bacias monitoradas, nas quais a inércia na reposta é mínima, observando o total de precipitação antes do início da formação de escoamento superficial. No entanto, estabelecer uma conexão teórica para a abstração inicial não é simples. Apesar de as áreas de interceptação e armazenamento superficial serem estimadas de acordo com o uso e tipo de solo, a infiltração é afetada por fatores como a intensidade do evento chuvoso, laterização e condições de umidade anteriores (Nascimento, *et al.*, 2011).

Contudo, diante diversos estudos desenvolvidos pelo SCS a partir de dados de bacias hidrográficas em diversas regiões dos Estados Unidos foi identificado que empiricamente, em média as abstrações representavam 20% do potencial de armazenamento máximo do solo (S), logo:

$$\square\square = 0,2 S \quad (5)$$

Substituindo-se (5) em (4), obtém-se:

$$\square = \frac{(\square - 0,2 \square)^2}{(\square - 0,8 S) + \square} \quad (6)$$

A equação (6) a vazão efetiva é válida quando:

$$\square > \square\square = 0,2 S \quad (7)$$

Quando:

$$\square < \square\square = 0,2 S \quad (8)$$

A vazão efetiva será igual a 0.

Para que seja determinado o potencial de armazenamento (S), o método SCS o vincula à tipologia do solo, o tipo de superfície e condições de umidade antecedente pelo parâmetro *Curve Number* (CN), logo:

$$\square = \frac{25400}{\square\square} - 254 \quad (9)$$

O valor de CN varia numa escala de 1 a 100, ele retrata as condições da cobertura de diversos solos, como áreas permeáveis (números próximos ou igual a 1) e áreas impermeáveis (números próximos ou igual a 100). Esses fatores foram tabelados conforme as classes de utilização do solo por (Setzer & Porto, 1975).

Solo A: Solos que produzem muito baixo escoamento superficial e muito alta infiltração Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%; não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

Solo B: Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas este limite pode subir a 20%, graças a maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras nem camadas argilosas até 1,5m, mas é quase sempre uma camada mais densificada que a camada superficial.

Solo C: Solos que geram escoamento superficial pouco acima da média e com capacidade de infiltração pouco abaixo da média. Solos barrentos com teor de argila de 20 a 30%, mas sem camadas de argilas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas estes dois limites podem ser 40% e 1,5m. Nota-se a cerca de 60cm de profundidade camada mais densificada que no grupo, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

Solo D: Solos com baixa capacidade de infiltração. Há duas possibilidades:

- Solos argilosos (30 a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a cerca de 50cm de profundidade;

- Solos arenosos como B, mas com a camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

Solo E: Solos com muito baixa capacidade de infiltração. Há duas possibilidades:

- Solos barrentos como C, mas com a camada argilosa impermeável ou com pedras;

- Solos barrentos como C, sem camada argilosa impermeável, mas com teor de argila superior a 40%.

Figura 2 - Valores de CN para bacias Urbanas e Sub-Urbanas

Utilização ou Cobertura do Solo			A	B	C	D	E
Zonas cultivadas:	sem conservação do solo		72	81	88	91	91
	com conservação do solo		62	71	78	81	81
Pastagens ou terrenos baldios:	más condições		68	79	86	89	89
	boas condições		39	61	74	80	80
Prado em boas condições			30	58	71	78	78
Bosques ou zonas florestais:	cobertura ruim		45	66	77	83	83
	cobertura boa		25	55	70	77	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições:	com relva em mais de 75% da área		39	61	74	80	80
	com relva de 50 a 75% da área		49	69	79	84	84
Zonas comerciais e de escritórios			89	92	94	95	95
Zonas industriais			81	88	91	93	93
Zonas residenciais:	Lotes de (m²)	% média impermeável					
	<500	65	77	85	90	92	92
	1000	38	61	75	83	87	87
	1300	30	57	72	81	86	86
	2000	25	54	70	80	85	85
	4000	20	51	68	79	84	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.			98	98	98	98	98
Arruamentos e estradas:	asfaltadas e com drenagem pluvial		98	98	98	98	98
	paralelepípedos		76	85	89	91	91
	terra		72	82	87	89	89

Fonte: (Setzer & Porto, 1975)

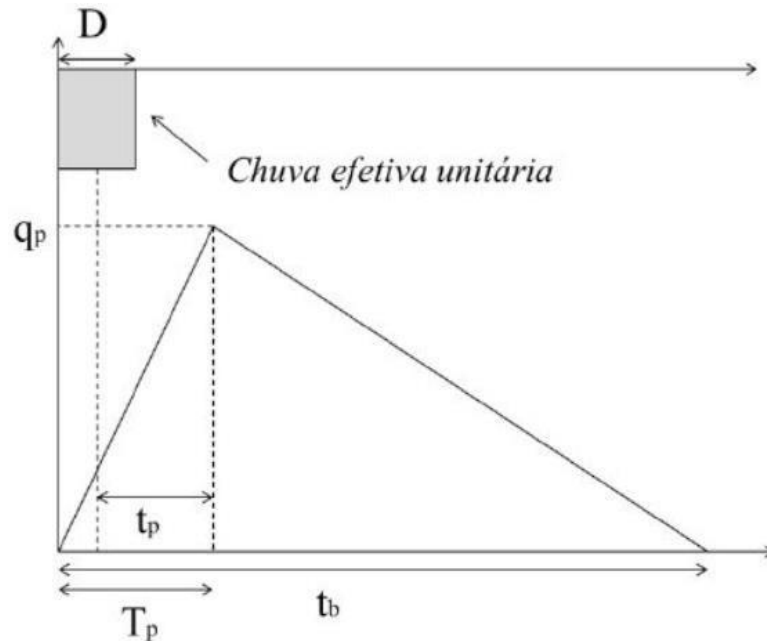
3.9.1 Vazão de projeto pelo método do Hidrograma Unitário Triangular (HUT) do Soil Conservation Service (SCS)

A vazão de projeto é determinada a partir da transformação de precipitação em vazão, onde a precipitação pode ser de projeto ou observada.

O método foi desenvolvido para áreas de contribuição superiores a 4km², ou

em situações em que seja necessário o conhecimento da distribuição ao longo do tempo das vazões/volume, sugere-se o modelo do Hidrograma Unitário Triangular (HUT), do *Soil Conservation Service* (Serviço de conservação do solo) (SCS, 1986) (Chow, Maidment, & Mays, 1988) e (Nascimento, et al., 2011).

Figura 3 - Hidrograma unitário triangular pelo método SCS



Fonte: (Tucci & Campana, 1993)

$$q_p = 0,6 * \frac{D}{T_p} \quad (10)$$

Onde:

t_p é o Tempo de pico que é o tempo desde a metade da duração da chuva efetiva;

T_c é o tempo de concentração da precipitação.

$$T_p = \frac{T_c}{2} \quad (11)$$

Onde:

T_p é o tempo de subida do hidrograma em horas;

D é a duração da chuva unitária em horas.

$$t_b = T_p + 1,67 * \frac{D}{q_p} \quad (12)$$

Onde:

t_b é o tempo desde o início do evento chuvoso até o fim do escoamento superficial no exutório da bacia.

$$\frac{A}{0,208 * P} = \dots$$

(13)

Onde:

A é a área da bacia hidrográfica em Km²;

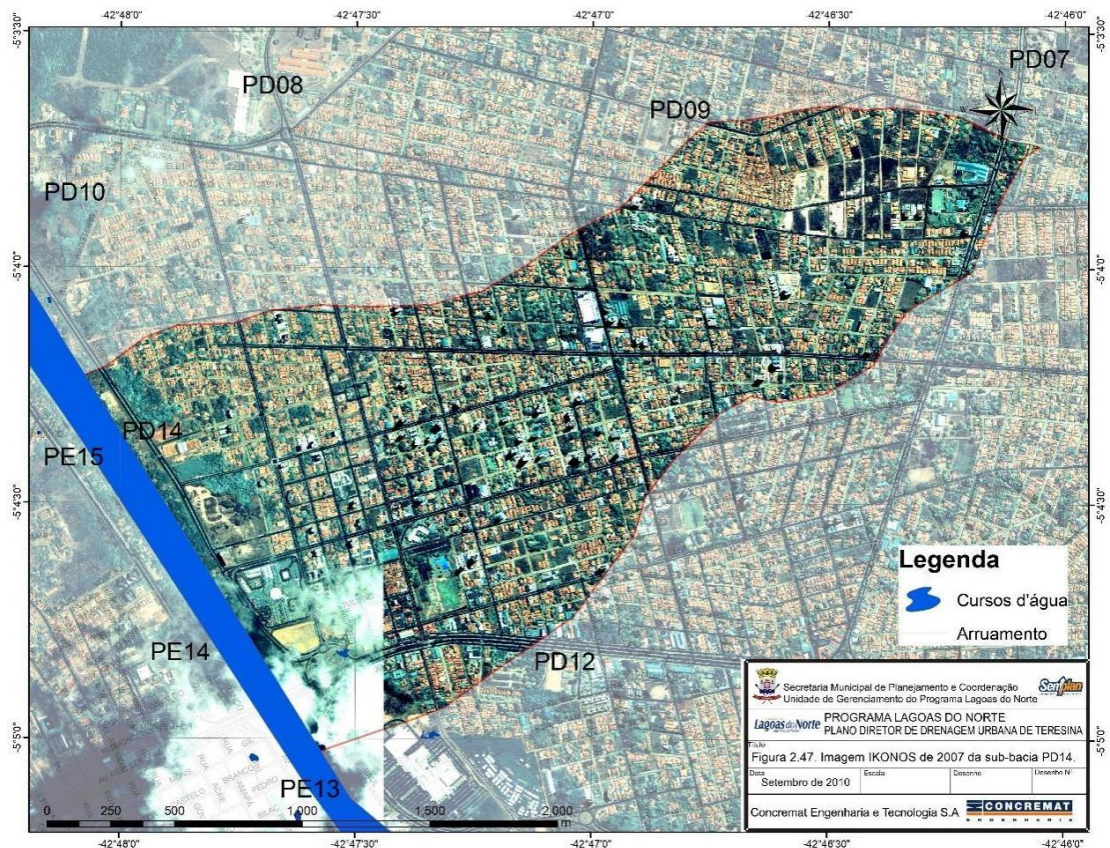
P é a precipitação em mm.

4 Procedimento metodológico

4.1 Região de Análise - Sub-bacia PD14

A bacia escolhida para o projeto de conclusão do curso foi a sub-bacia PD14, localizada perpendicular ao rio Poti, na parte central da cidade de Teresina/PI que muito se chama a atenção pelo grande percentual de impermeabilidade do solo e recorrência em alagamentos devido à ausência ou ineficiência de sistemas de drenagem (Teresina, 2010).

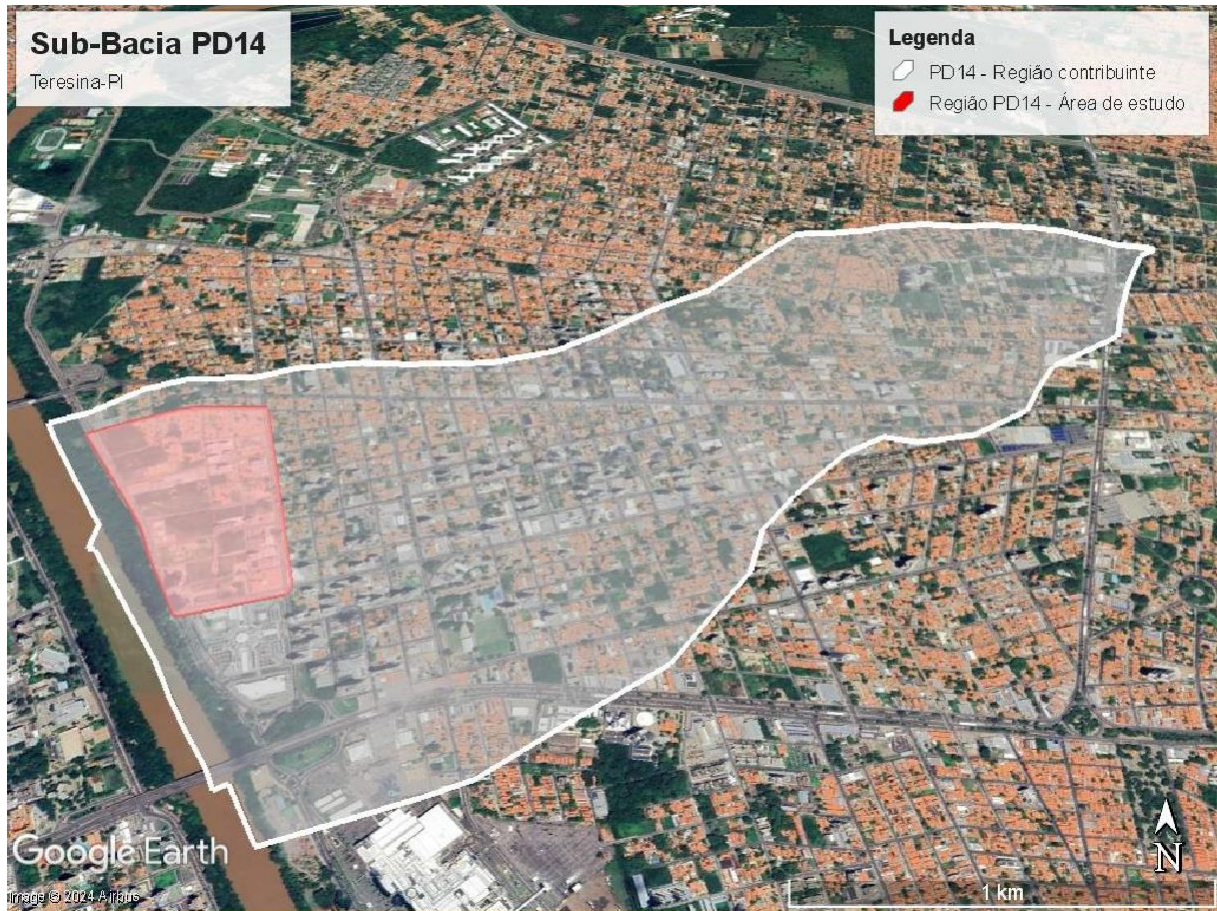
Figura 4 – Sub-Bacia PD14, Teresina – Piauí



Fonte: (Teresina, 2010)

4.1.1 Delimitação da área de descarga

Figura 5 - Região de estudo e delimitação de região de descarga



Fonte: Google Earth Pro (2024)

Figura 6 - Área de estudo - Região de descarga



Fonte: Google Earth Pro (2024)

A região escolhida para descarga da vazão gerada na sub-bacia PD14 é delimitado pelas avenidas Ininga, Joguei Clube, Raul Lopes e Rua José Paulino, região de 360,81m² e de menor cota da bacia, logo, região à jusante da PD14.

4.2 Metodologia

O Software HEC-HMS, versão 4.11 foi utilizada para a modelagem, geração do hidrograma, análise do comportamento do dispositivo de extravasão e cota da lâmina de água diante das precipitações em seus respectivos tempos de retornos diante do modelo de estudo adotado, Sub-Bacia PD14.

Após modelagem foi gerado mapa com a mancha de alagamento dentro da região de descarga que funcionará como dispositivo de retenção, fazendo com que a precipitação seja descarregada gradativamente.

Diante dos diversos tempos de retorno será possível também verificar se o

dispositivo que atualmente está construído, boca de lobo, é capaz de suprir o volume gerado e seu comportamento.

4.3 Coleta de dados

A identificação dos parâmetros hidrológicos essenciais é o primeiro passo crítico no processo de coleta de dados para a modelagem foco desta pesquisa. Os parâmetros fornecem informações fundamentais sobre os processos hidrológicos que influenciam a ocorrência e funcionalidade das cheias na determinada área estudada, sub-bacia PD14.

As características do solo, como permeabilidade, capacidade de infiltração e cobertura vegetal desempenham um papel importante na modulação do escoamento superficial.

4.3.1 Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

A equação genérica para as curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Teresina/PI também foi definido de acordo com o PDDrU - THE e foi utilizada para definir o hietograma de entrada do modelo chuva-vazão para a área modelada no estudo:

$$I = \frac{1194,27 \cdot T^{0,1738}}{(t+10)^{0,7457}} \quad (14)$$

Onde:

I é a intensidade da chuva em mm/h;

T é o período em anos;

t o tempo de concentração da bacia em min.

4.3.2 Tempo de concentração (TC)

O tempo de concentração é o tempo que uma gota de água leva para percorrer do ponto mais alto (montante) até o mais baixo (exutório da bacia), ou melhor dizendo, é o tempo que a vazão de uma determinada propagação de cheia leva até o exutório (Silveira, 2005). Assim como em áreas rurais e em regiões urbanizadas pode haver interferência, como a declividade da bacia, impermeabilidade do solo, presença de

vegetação, o formato do talvegue, a precipitação, o tempo de retorno, assim como outros fatores que influenciam diretamente nos resultados dos valores calculados.

Diante posto, há diversos meios de se calcular o fator “Tempo de concentração” de uma bacia hidrográfica. Silveira (2005) desenvolveu um estudo na qual avaliou os mais conhecidos.

Tabela 2 - Fórmulas de tempo de concentração testados

Nome	Equação (1)
Izzard (2)	$T_c = 85,5(i/36286+C_r)i^{-0,667}L^{0,33}S^{-0,333}$
Kerby-Hathaway (3)	$T_c = 0,619N^{0,47}L^{0,47}S^{-0,235}$
Onda Cinem. (2)	$T_c = 7,35n^{0,6}i^{-0,4}L^{0,6}S^{-0,3}$
FAA (2)	$T_c = 0,37(1,1-C)L^{0,5}S^{-0,333}$
Kirpich (2)	$T_c = 0,0663L^{0,77}S^{-0,385}$
SCS Lag (2)	$T_c = 0,057(1000/CN-9)^{0,7}L^{0,8}S^{-0,5}$
Simas-Hawkins (4)	$T_c = 0,322A^{0,594}L^{0,594}S^{-0,150}S_{SCS}^{-0,313}$
Ven te Chow (5)	$T_c = 0,160L^{0,64}S^{-0,32}$
Dooge (6)	$T_c = 0,365A^{0,41}S^{-0,17}$
Johnstone (7)	$T_c = 0,462L^{0,5}S^{-0,25}$
Corps Engineers (8)	$T_c = 0,191L^{0,76}S^{-0,19}$
Giandotti (9)	$T_c = 0,0559(4,0A^{0,5}+1,5L)L^{-0,5}S^{-0,5}$
Pasini (10)	$T_c = 0,107A^{0,333}L^{0,333}S^{-0,5}$
Ventura (10)	$T_c = 0,127A^{0,5}S^{-0,5}$
Picking (11)	$T_c = 0,0883L^{0,667}S^{-0,333}$
DNOS (12)	$T_c = 0,419k^{-1}A^{0,3}L^{0,2}S^{-0,4}$
George Ribeiro (13)	$T_c = 0,222(1,05-0,2p)^{-1}LS^{-0,04}$
Schaake et al (14)	$T_c = 0,0828L^{0,24}S^{-0,16}A_{imp}^{-0,26}$
McCuen et al (15)	$T_c = 2,25i^{-0,7164}L^{0,5552}S^{-0,2070}$
Carter (15)	$T_c = 0,0977L^{0,6}S^{-0,3}$
Eagleson (15)	$T_c = 0,274nR^{-0,67}LS^{-0,5}$
Desbordes (16)	$T_c = 0,0869A^{0,3039}S^{-0,3832}A_{imp}^{-0,4523}$
Espey-Winslow (15)	$T_c = 0,343\phi L^{0,29}S^{-0,145}A_{imp}^{-0,6}$

Fonte: (Silveira, 2005)

Na tabela 3 está disposto as características dos modelos utilizados para se chegar nas fórmulas tratadas, podendo perceber-se que um dos fatores que mais influenciam é o tipo de região, “Urbano” ou “Rural”, fator que impacta os valores no momento do cálculo.

Tabela 3 - Características das bacias hidrográficas utilizadas durante os estudos

Nome	Local	Nº bacias	Área km²	S %	L km	Tipo
Izzard	EUA	-	-	<4	<0,02 2	Parcela
Kerby	EUA	-	< 0,05	<1	<0,37	Parcela
O. Cin.	EUA	-	-	-	<0,03	Parcela
FAA	EUA	-	-	-	-	Parcela
Kirpich	EUA	6/7	<0,45	3/10	<1,2	Rural
SCS Lag	EUA	-	< 8,1	-	-	Rural
Simas	EUA	168	<15	-	-	Rural
Chow	EUA	20	1,1/19	-	-	Rural
Dooge	Irlanda	10	140/9 30	-	-	Rural
Johnst.	EUA	19	65/42 00	-	-	Rural
C. Eng.	EUA	25	<12000	<14	<257	Rural
Giandotti	Itália	-	-	-	-	Rural
Pasini	Itália	-	-	-	-	Rural
Ventura	Itália	-	-	-	-	Rural
Picking	-	-	-	-	-	Rural
DNOS	EUA	6	<0,45	3/10	<1,2	Rural
G. Ribeiro	EUA/Índia	8	<19000	1/10	<250	Rural
Schaake	EUA	19	<0,7	<7	<1,8	Urbana
McCuen	EUA	48	0,4-16	<4	<10	Urbana
Carter	EUA	-	<21	<0,5	<12	Urbana
Eagleson	EUA	-	<21	-	-	Urbana
Desbordes	França	21	<51	<7	<18	Urbana
Espey	EUA	17	<91	-	-	Urbana

Fonte: (Silveira, 2005)

Para avaliar as fórmulas de TC, Silveira (2005) desenvolveu um método de “Avaliação das fórmulas”, baseando-se nos erros médios percentuais de erro médio (EM) e erro padrão (EP), tomando como resultado favorável menor ou igual a 30%.

$$EM = \frac{100 \sum_{i=1}^n \frac{TC_i - TC_{obs}}{TC_{obs}}}{n} \quad (15)$$

$$EP = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(100 \frac{TC_i - TC_{obs}}{TC_{obs}} - EM \right)^2 \quad (16)$$

Como resultado, Silveira (2005) apontou as fórmulas que obtiveram melhores desempenhos diante do meio utilizado, conforme tabela 4:

Tabela 4 – Fórmulas de TC recomendadas

Fórmulas	Ordem	Bacias rurais			Bacias urbanas		
		Áreas (km ²)	EM%	EP %	Áreas (ha)	EM %	EP %
Corps E.	1R	<12000	9	21			
V. Chow	2R	<12000	-7	19			
Onda Cin.	3R	<12000	2	20			
Kirpich	4R, 3U	<12000	-9	19	<2700	1	39
Carter	1U				<1100	1	40
Schaake	2U				<62	-9	30
Desbordes	4U				<5100	11	49

Fonte: (Silveira, 2005)

Para o presente estudo, como a área é de aprox. 425ha e Urbana, ele se enquadra para que seja utilizada a fórmula de Carter:

$$T_c = 0,0977 A^{0,6} L^{-0,3} S \quad (17)$$

Onde:

Tc é Tempo de concentração em min;

L é o comprimento do Talvegue em km;

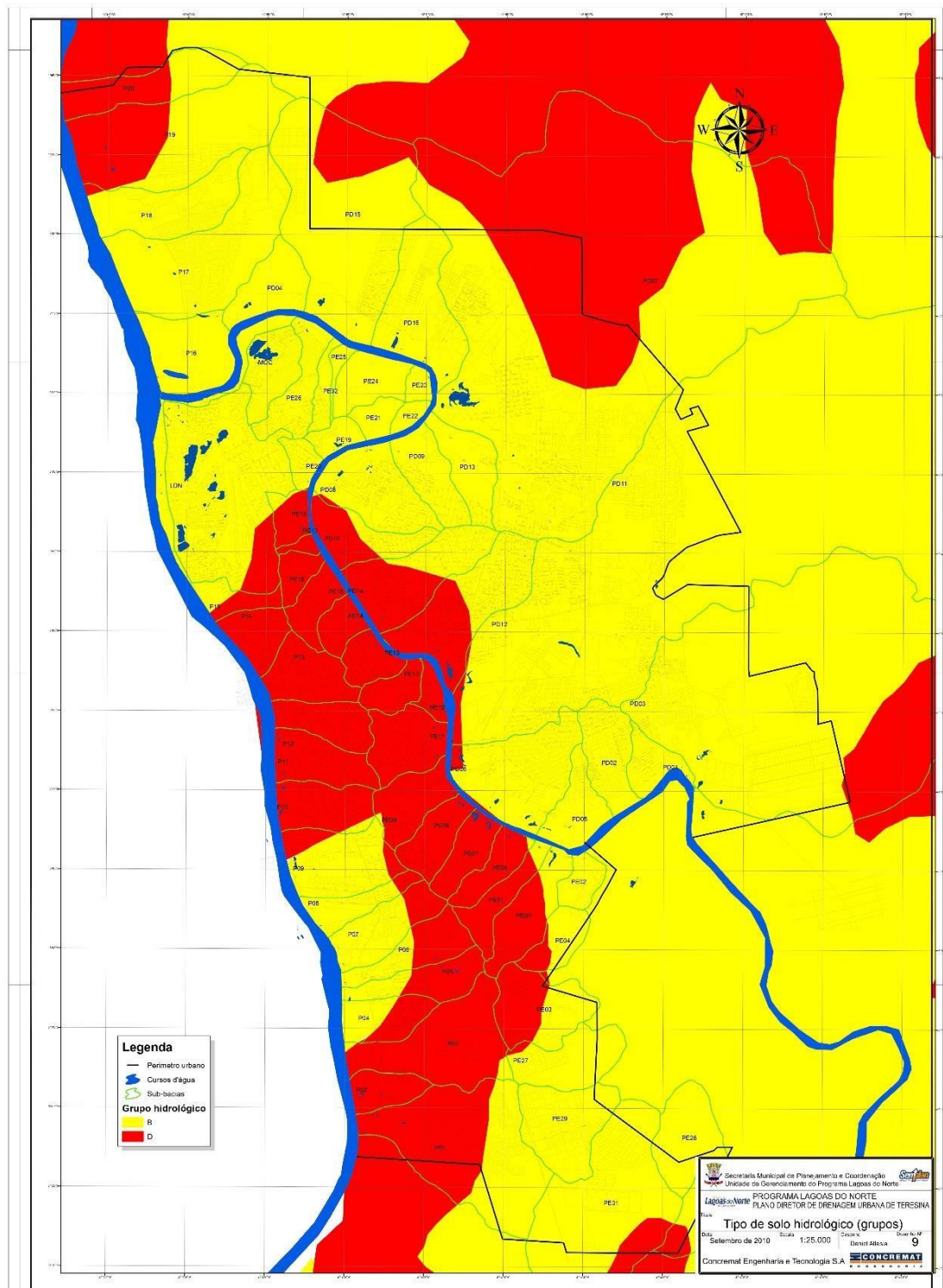
S é Declividade da Bacia m/m.

4.3.3 Curve Number (CN) pelo método SCS

Conforme descrito no tópico 3.9, sobre o método SCS, para determinar o CN da área de estudo deve-se ser identificado as características do solo, como capacidade mínima de infiltração e sua utilização.

Como auxílio, foi utilizado o mapa disponibilizado pelo PDDrU - THE (Semplan, 2024):

Figura 7 - Tipo de solo hidrológico (grupos)



Fonte: (Teresina, 2010)

Pode-se identificar que aproximadamente metade da sub-bacia PD14 esta agrupada no solo tipo B e metade no solo tipo D e de acordo com a figura 02, o solo é utilizado em sua maioria por comércio e escritório, logo:

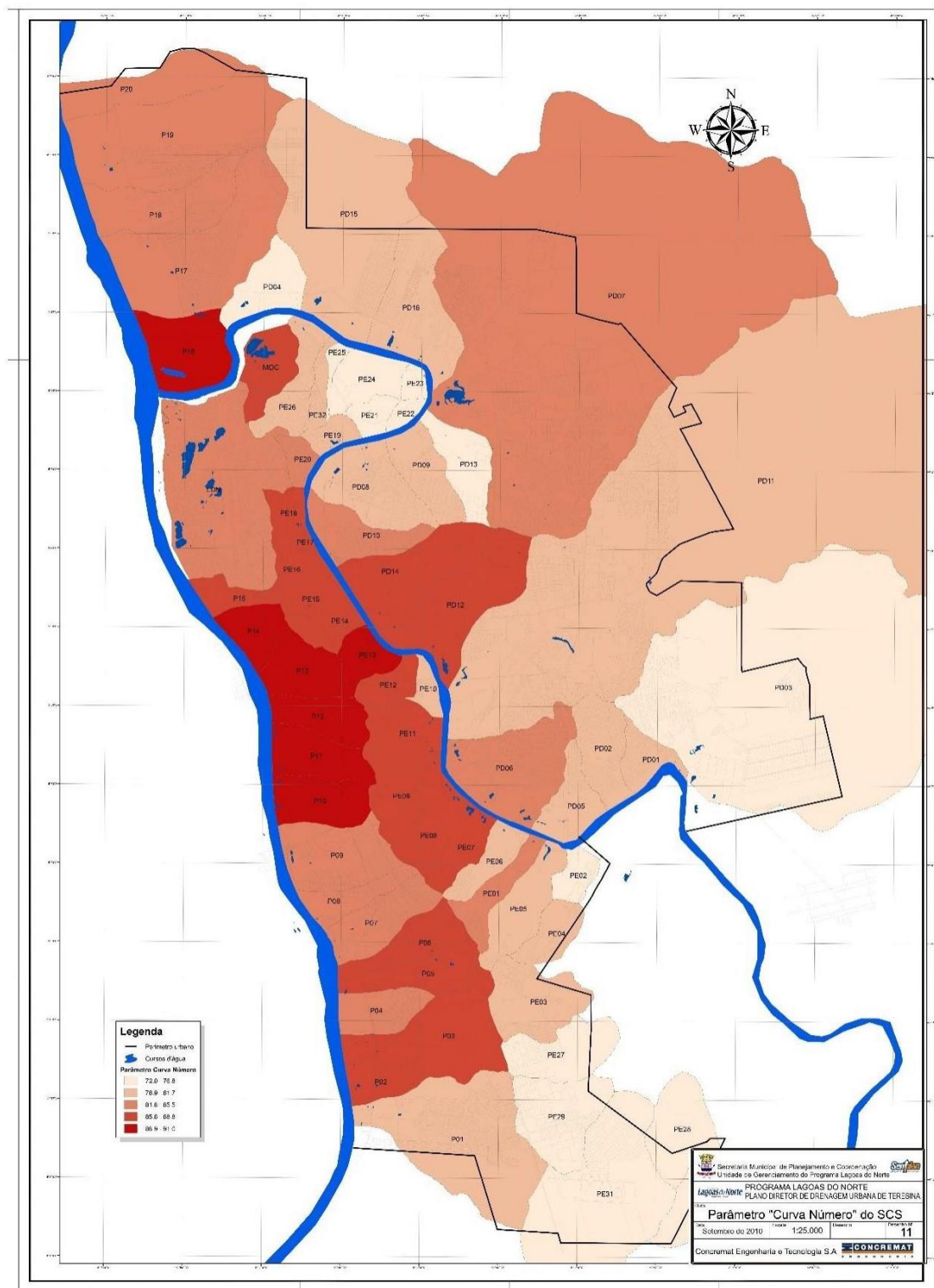
Tabela 5 - Cálculo de "Número Curva" - PD14

Sub-Bacia	Grupo Hidrológico	Área Impermeável	CN	CN Ponderado
PD14	B	76,99%	85	88,5
	D	76,99%	92	

Fonte: Autor (2024)

O resultado está similar ao levantamento documentado pelo PDDrU - THE, figura á baixo parametriza que a sub-bacia PD14 tem um CN que varia de 85,6 a 88,8.

Figura 8 - Parâmetro "Curva Número" do SCS



Fonte: (Teresina, 2010)

4.3.4 Área Impermeável

Para verificação da área impermeável da bacia em estudo foi utilizado uma

metodologia de classificação de imagem disponível no plugin *dzetsaka: Classification tool*, do software Qgis, versão 3.22.5, um Sistema Integrado de Georreferenciamento (SIG) que suporta inúmeros formatos de *vetores*, *rasters* e bases de dados, além de apresentar funcionalidade em constante crescimento diante das funções originárias e complementos.

A imagem processada foi gerada no Google Earth Pro, resolução máxima (8192 x 4368) para que ela pudesse trazer uma maior riqueza de cores e quantidade de Pixels.

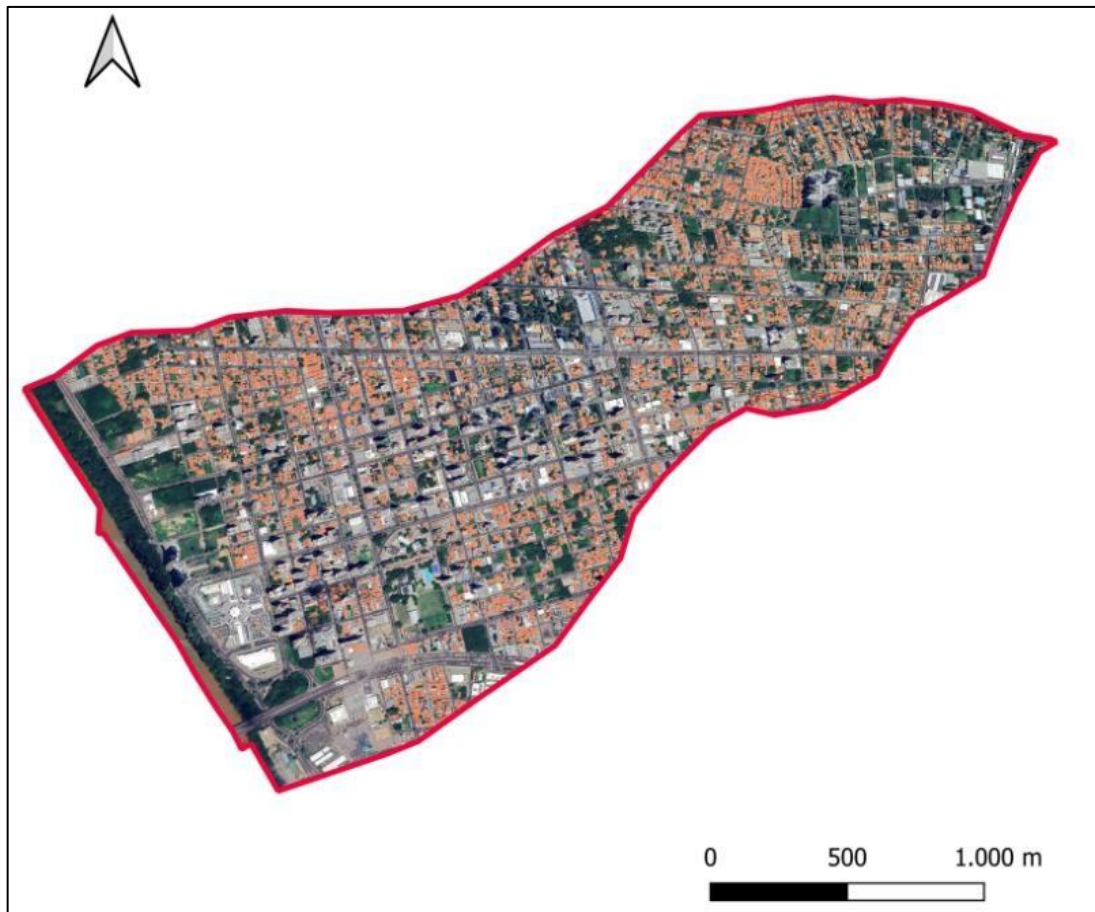
Figura 9 - Sub-Bacia PD14



Fonte: Google Earth Pro (2024)

Após importação da imagem (*raster*) foi utilizado um arquivo *shapefile* (vetor) (Semplan, 2024) para delimitar e recortar a imagem base, assim foi gerado a imagem da sub-bacia PD14 para classificação.

Figura 10 - Sub-Bacia PD14 recortada



Fonte: Autor (2024)

4.3.4.1 Classificação

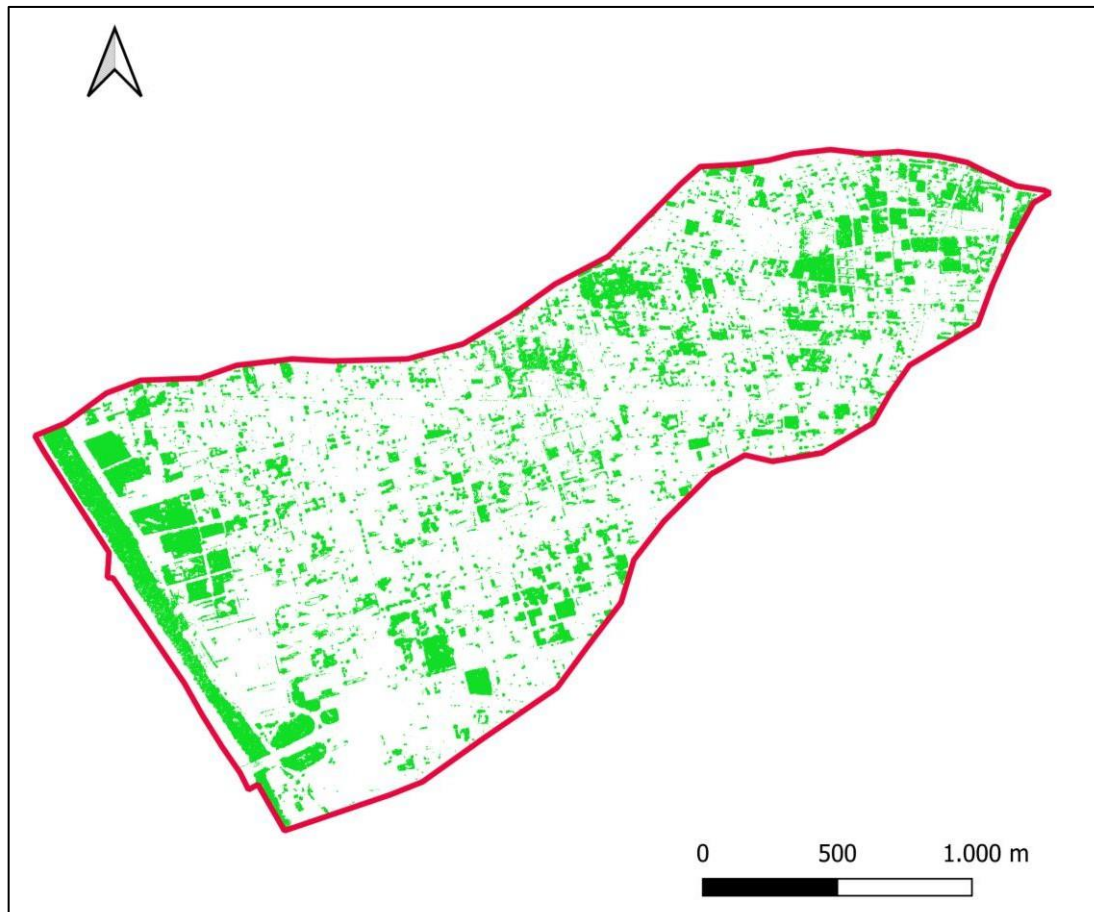
O processamento da imagem tem como propósito determinar a variedade de feições da superfície, como vegetação, pavimentação, telhados entre outros.

A classificação automática consiste em associar os Pixels a uma classe que represente um objeto real, a partir de imagens supervisionadas, onde o primeiro indica a localização das classes e o algoritmo realiza o processamento em toda a imagem, selecionando os demais pixels semelhantes ao escolhido.

O resultado da classificação resulta em um mapa temático que demonstra uma distribuição da classe associada de forma organizada agrega dados a um SIG.

Diante do presente estudo, a classificação de imagem foi utilizada para identificar as áreas permeável da Sub-bacia PD14, como mostra a imagem a seguir:

Figura 11 - Sub-Bacia PD14 - Classificação de áreas permeáveis

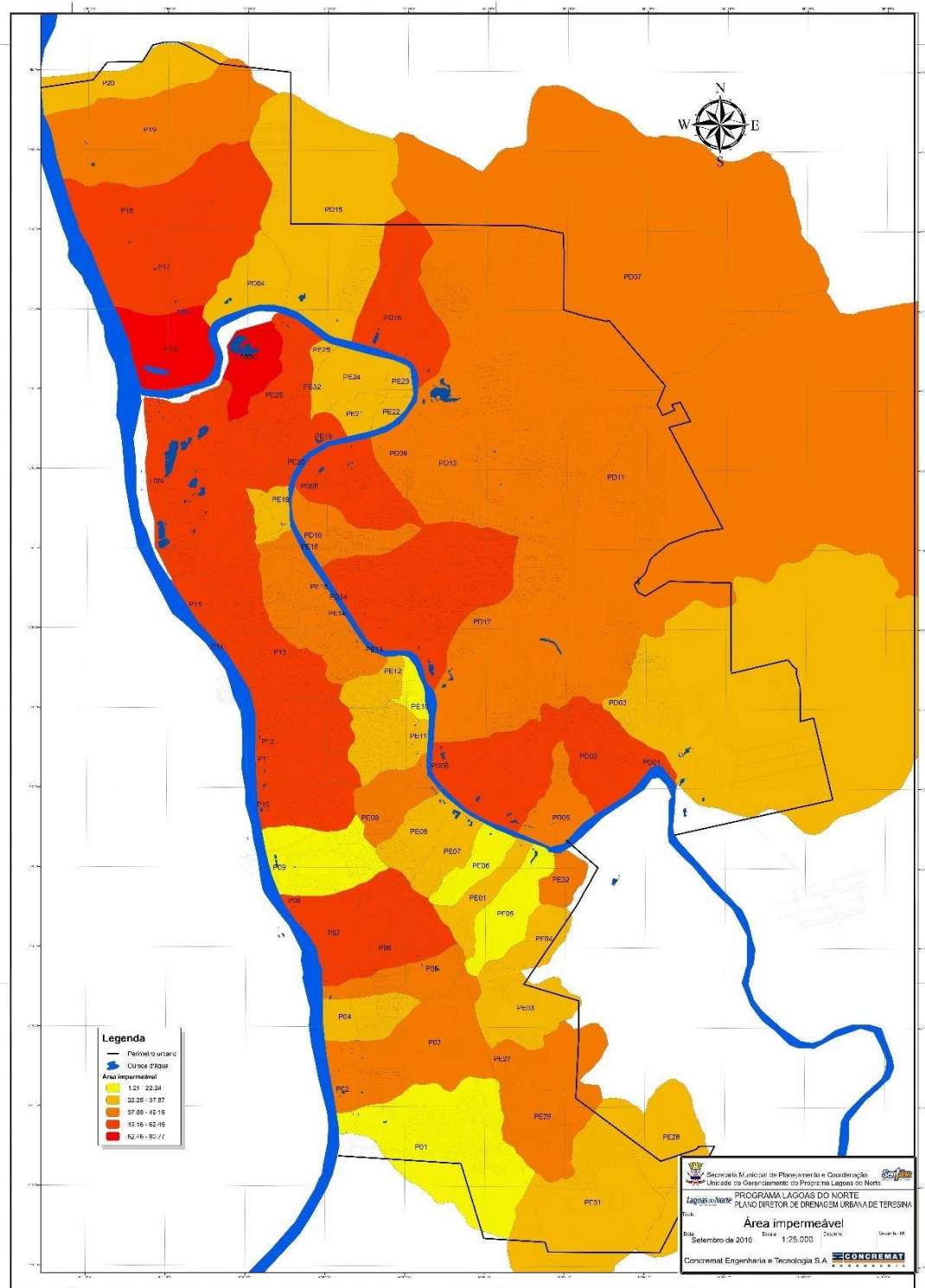


Fonte: Autor (2024)

Como resultado, obteve-se que Aproximadamente 23,01% da área da sub-bacia está coberta por áreas verdes, logo, permeável e 76,99% impermeável.

Como forma de validação, foi utilizado o mapa disposto no PDDrU - THE e o mesmo informa que para a Sub-Bacia PD14 a uma variação de 62,46% à 80,77% de área impermeável, logo, o resultado da modelagem está dentro do parâmetro.

Figura 12 - Sub-Bacia PD14 – Área impermeável, Teresina – Piauí



Fonte: (Teresina, 2010)

4.3.5 Dados Fisiográficos

Dados fisiográficos representam as características da sub-bacia obtidos a partir

dos levantamentos disponibilizados no Plano diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDrU - THE) e modelagens próprias, às quais apontam as seguintes informações:

Tabela 6 – Dados fisiográficos – Sub-bacia PD14

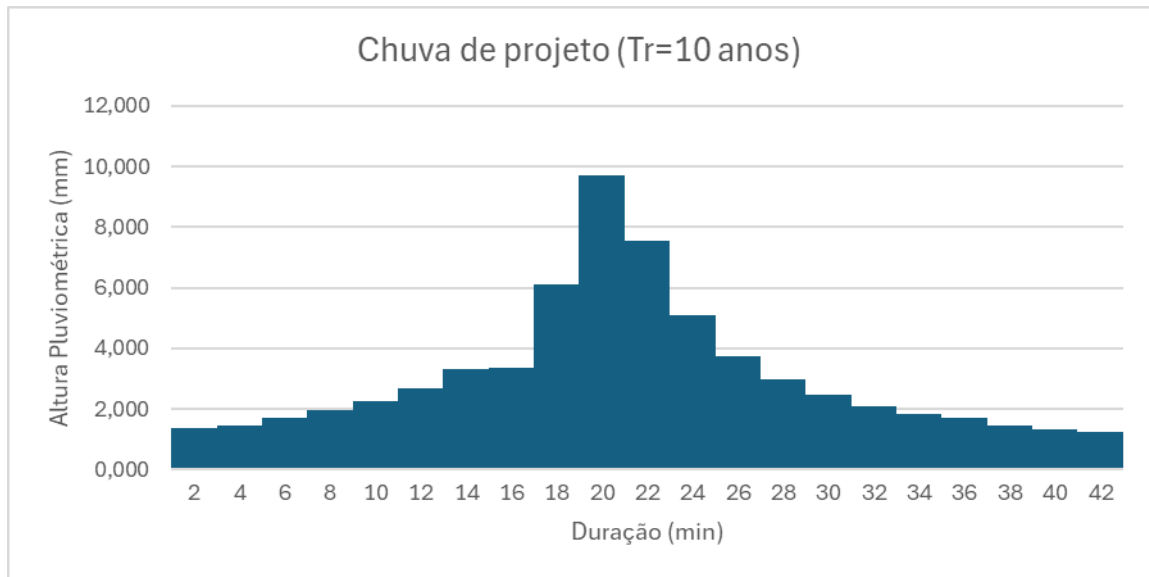
Dados fisiográficos – Sub-Bacia PD14		
Área	m ²	4250228,962
Área Impermeável	%	76,99
Área Permeável	%	23,01
Curve Number	-	88,5
Perímetro	M	9828,317
Comprimento do Talvegue	KM	3256,497
Cota a montante	M	124,16
Cota a jusante	M	61,34
Desnível ΔH	M	62,82
Declividade da Bacia	m/m	0,0193

Fonte: Autor (2024)

4.3.6 Hietograma pelo método dos blocos alternados

Hietograma, de forma prática é um gráfico que apresenta a intensidade da precipitação ao longo da sua duração. O presente estudo utilizará do método dos blocos alternados que é de simples aplicação. O método aplica através das intensidades dadas pela IDF o hietograma adiantado, logo, o maior valor no primeiro intervalo de tempo e as demais durações acumulativas a partir deste pico até o limite da duração do evento (Tucci C. E., 1997).

O método que se dá o nome, reordena os valores de forma a posicionar o pico no centro, cada “bloco” de chuva do hietograma é alternado à direita e esquerda do Pico.

Figura 13 - Modelo de Hietrograma de Chuva com $T_r = 10$ anos

Fonte: Autor (2024)

4.4 Informações de entrada para modelagem no Software HEC-HMS

4.4.1 Tempo de concentração (TC)

De acordo com os dados fisiográficos da sub-bacia PD14 e a equação do Tempo de Concentração disposto no tópico 4.3.2 foi possível calcular o TC da região, o resultado foi 40,92min., porém, o valor foi aproximado para 42min., para quesito de cálculo e estudo do tópico a seguir.

Tabela 7 - Cálculo de Tempo de concentração (TC)

Tempo de concentração (TC)							
A (m²)	A (Km²)	A (ha²)	ΔH (m)	L (Km)	S (m/m)	i (%)	TC (min)
4.250.228,962	4,250	425,022	62,82	3256,497	0,0193	1,929%	42,00

Fonte: Autor (2024)

Onde:

A é a área da sub-bacia em metro² e kilometro²;

ΔH é o desnível entre o montante e a cota jusante da sub-bacia em metro;

L é o comprimento do talvegue em quilometro;

i é a declividade em metro por metro e percentual;

TC é o tempo de concentração calculado em minuto.

4.4.2 Chuva de projeto pelo método dos blocos alternados utilizando Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Teresina/PI

A duração da precipitação será equivalente ao tempo de concentração calculado no tópico 4.4.1.

4.4.2.1 Tempo de Retorno (Tr) 2 anos

Tabela 8 - Chuva de projeto - Tr 2 = anos - Blocos alternados

Duração (min)	42,00	Intervalo de tempo (min):	2,00	Nº de Intervalos:	21	Tempo de retorno (anos)	2
Tempo (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	Pdesac (mm)	Ordem Crescente	Ordem Alternada	Prearr (mm)	
2	209,889	7,346	7,346	1	19	1,051	
4	186,278	13,039	5,693	2	17	1,103	
6	168,072	17,648	4,608	3	15	1,303	
8	153,549	21,497	3,849	4	13	1,482	
10	144,293	24,049	2,552	5	11	1,717	
12	134,393	26,879	2,830	6	9	2,041	
14	125,950	29,388	2,510	7	7	2,510	
16	118,653	31,641	2,252	8	5	2,552	
18	112,273	33,682	2,041	9	3	4,608	
20	106,643	35,548	1,866	10	1	7,346	
22	101,632	37,265	1,717	11	2	5,693	
24	97,140	38,856	1,591	12	4	3,849	
26	93,087	40,338	1,482	13	6	2,830	
28	89,408	41,724	1,386	14	8	2,252	
30	86,053	43,027	1,303	15	10	1,866	
32	82,831	44,315	1,288	16	12	1,591	
34	80,149	45,418	1,103	17	14	1,386	
36	77,536	46,522	1,104	18	16	1,288	
38	75,114	47,572	1,051	19	18	1,104	
40	72,862	48,575	1,002	20	20	1,002	
42	70,762	49,533	0,959	21	21	0,959	

Fonte: Autor (2024)

Onde:

I é a intensidade pela fórmula IDF de Teresina/PI em milímetro por hora;

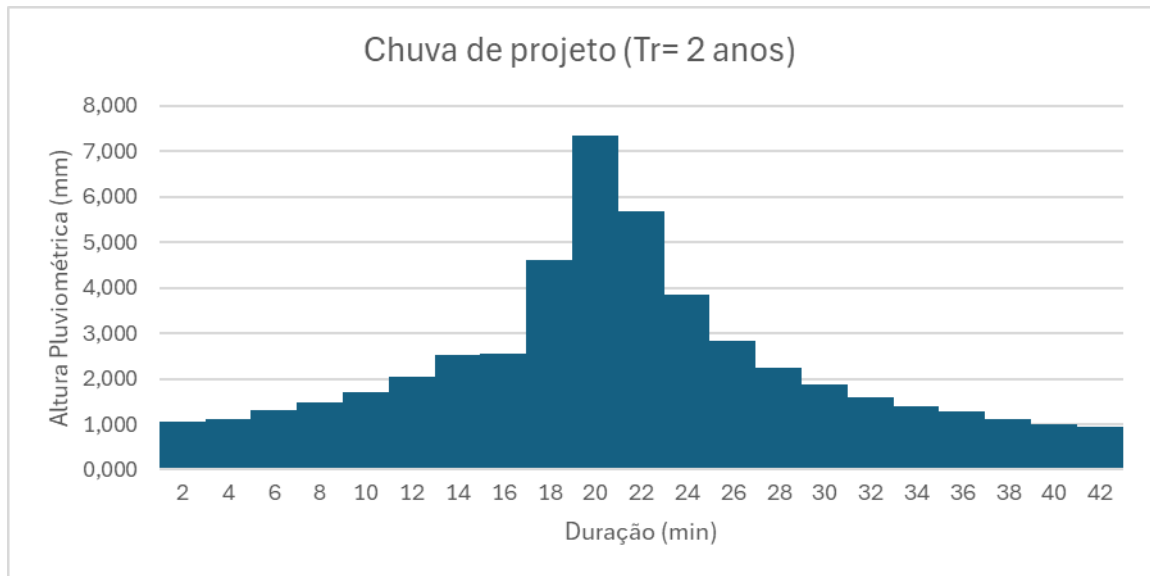
P_{acum} é a precipitação acumulada dado em milímetro;

P_{desac} é a precipitação desacumulada dado em milímetro;

P_{rearr} é a precipitação rearrumada conforme o método dos blocos alternados.

4.4.2.1.1 Hietograma (Tr) 2 anos

Figura 14 - Hietograma Tr 2 = anos



Fonte: Autor (2024)

4.4.2.2 Tempo de Retorno (Tr) 5 anos

Tabela 9 - Chuva de projeto - Tr 5 = anos - Blocos alternados

Duração (min)	42,00	Intervalo de tempo (min):	2,00	Nº de Intervalos:	21	Tempo de retorno (anos)	5
Tempo (min)	I (mm/h)	P_{acum} (mm)	P_{desac} (mm)	Ordem Crescente	Ordem Alternada	P_{rearr} (mm)	
2	246,123	8,614	8,614	1	19	1,232	
4	218,435	15,290	6,676	2	17	1,294	
6	197,086	20,694	5,404	3	15	1,528	

8	180,057	25,208	4,514	4	13	1,737
10	169,202	28,200	2,992	5	11	2,014
12	157,594	31,519	3,318	6	9	2,394
14	147,693	34,462	2,943	7	7	2,943
16	139,136	37,103	2,641	8	5	2,992
18	131,655	39,497	2,394	9	3	5,404
20	125,053	41,684	2,188	10	1	8,614
22	119,177	43,698	2,014	11	2	6,676
24	113,910	45,564	1,865	12	4	4,514
26	109,157	47,301	1,737	13	6	3,318
28	104,843	48,927	1,626	14	8	2,641
30	100,909	50,454	1,528	15	10	2,188
32	97,131	51,965	1,511	16	12	1,865
34	93,986	53,259	1,294	17	14	1,626
36	90,921	54,553	1,294	18	16	1,511
38	88,081	55,785	1,232	19	18	1,294
40	85,440	56,960	1,175	20	20	1,175
42	82,978	58,084	1,124	21	21	1,124

Fonte: Autor (2024)

Onde:

I é a intensidade pela fórmula IDF de Teresina/PI em milímetro por hora;

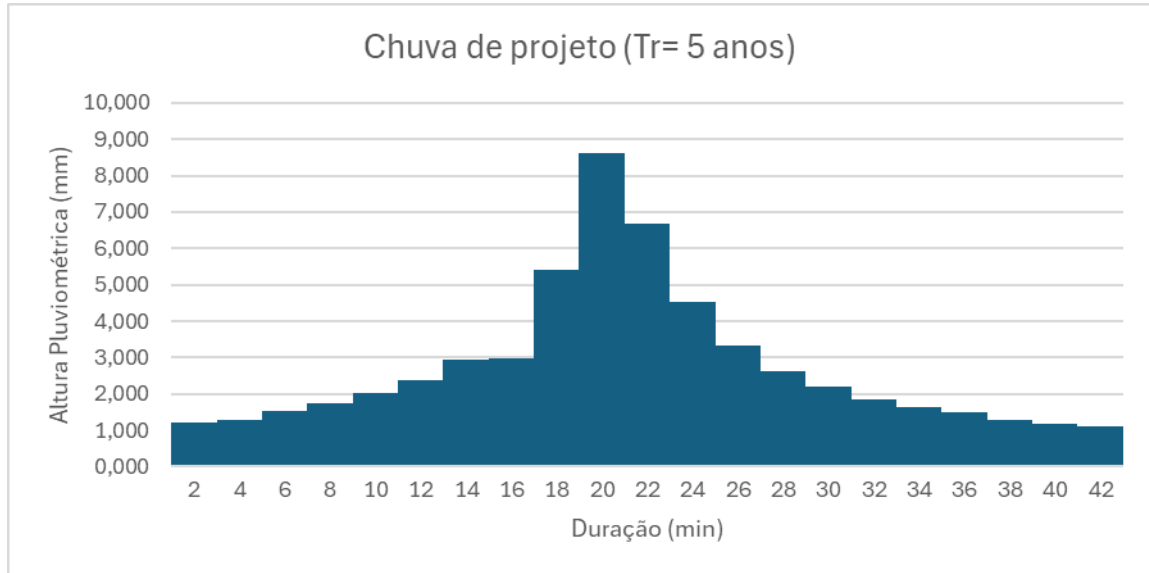
Pacum é a a precipitação acumulada dado em milímetro;

Pdesac é a precipitação desacumulada dado em milímetro;

Prearr é a precipitação rearrumada conforme o método dos blocos alternados.

4.4.2.2.1 Hietograma (Tr) 5 anos

Figura 15 - Hietograma Tr 5 = anos



Fonte: Autor (2024)

4.4.2.3 Tempo de Retorno (Tr) 10 anos

Tabela 10 - Chuva de projeto - Tr 10 = anos - Blocos alternados

Duração (min)	42,00	Intervalo de tempo (min):	2,00	Nº de Intervalos:	21	Tempo de retorno (anos)	10
Tempo (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	Pdesac (mm)	Ordem Crescente	Ordem Alternada	Prearr (mm)	
2	277,633	9,717	9,717	1	19	1,390	
4	246,401	17,248	7,531	2	17	1,459	
6	222,318	23,343	6,095	3	15	1,723	
8	203,109	28,435	5,092	4	13	1,960	
10	190,865	31,811	3,376	5	11	2,272	
12	177,770	35,554	3,743	6	9	2,700	
14	166,602	38,874	3,320	7	7	3,320	
16	156,949	41,853	2,979	8	5	3,376	
18	148,511	44,553	2,700	9	3	6,095	
20	141,063	47,021	2,468	10	1	9,717	
22	134,435	49,293	2,272	11	2	7,531	
24	128,493	51,397	2,104	12	4	5,092	
26	123,131	53,357	1,960	13	6	3,743	

28	118,266	55,191	1,834	14	8	2,979
30	113,828	56,914	1,723	15	10	2,468
32	109,566	58,618	1,704	16	12	2,104
34	106,018	60,077	1,459	17	14	1,834
36	102,562	61,537	1,460	18	16	1,704
38	99,358	62,927	1,390	19	18	1,460
40	96,379	64,253	1,326	20	20	1,326
42	93,601	65,521	1,268	21	21	1,268

Fonte: Autor (2024)

Onde:

I é a intensidade pela fórmula IDF de Teresina/PI em milímetro por hora;

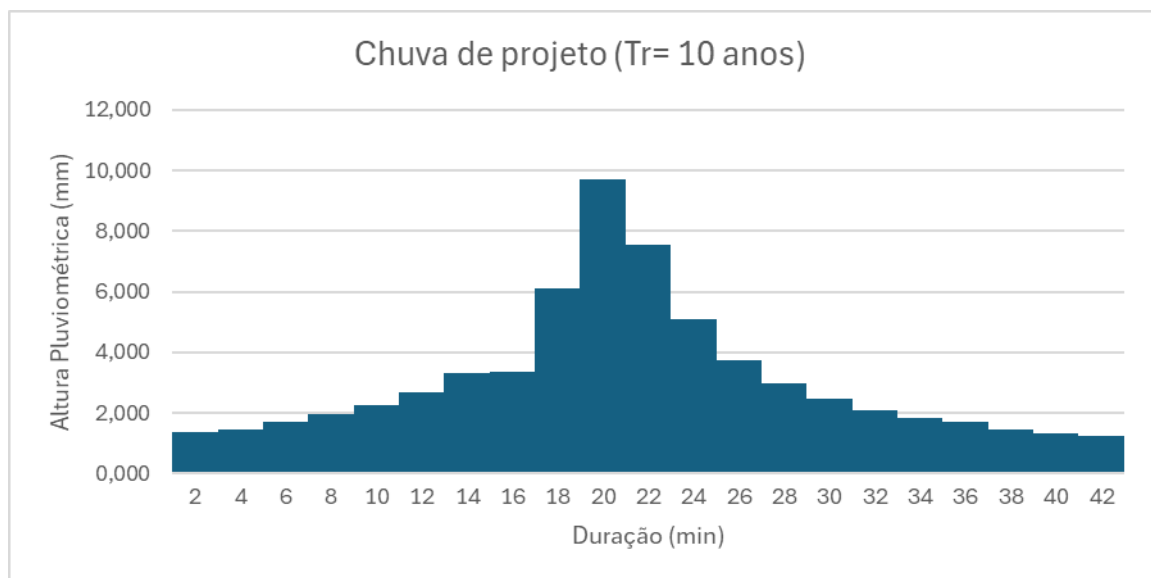
Pacum é a precipitação acumulada dado em milímetro;

Pdesac é a precipitação desacumulada dado em milímetro;

Prearr é a precipitação rearrumada conforme o método dos blocos alternados.

4.4.2.3.1 Hietograma (Tr) 10 anos

Figura 16 - Hietograma Tr = 10 anos



Fonte: Autor (2024)

4.4.2.4 Tempo de Retorno (Tr) 25 anos

Tabela 11 - Chuva de projeto - Tr 25 = anos - Blocos alternados

Duração (min)	42,00	Intervalo de tempo (min):	2,00	Nº de Intervalos:	21	Tempo de retorno (anos)	25
Tempo (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	Pdesac (mm)	Ordem Crescente	Ordem Alternada	Prearr (mm)	
2	325,561	11,395	11,395	1	19	1,630	
4	288,938	20,226	8,831	2	17	1,711	
6	260,698	27,373	7,148	3	15	2,021	
8	238,172	33,344	5,971	4	13	2,298	
10	223,814	37,302	3,958	5	11	2,664	
12	208,459	41,692	4,389	6	9	3,166	
14	195,363	45,585	3,893	7	7	3,893	
16	184,043	49,078	3,494	8	5	3,958	
18	174,149	52,245	3,166	9	3	7,148	
20	165,416	55,139	2,894	10	1	11,395	
22	157,643	57,803	2,664	11	2	8,831	
24	150,675	60,270	2,468	12	4	5,971	
26	144,388	62,568	2,298	13	6	4,389	
28	138,682	64,718	2,150	14	8	3,494	
30	133,478	66,739	2,021	15	10	2,894	
32	128,481	68,737	1,998	16	12	2,468	
34	124,321	70,448	1,711	17	14	2,150	
36	120,267	72,160	1,712	18	16	1,998	
38	116,510	73,790	1,630	19	18	1,712	
40	113,017	75,345	1,555	20	20	1,555	
42	109,759	76,832	1,487	21	21	1,487	

Fonte: Autor (2024)

Onde:

I é a intensidade pela fórmula IDF de Teresina/PI em milímetro por hora;

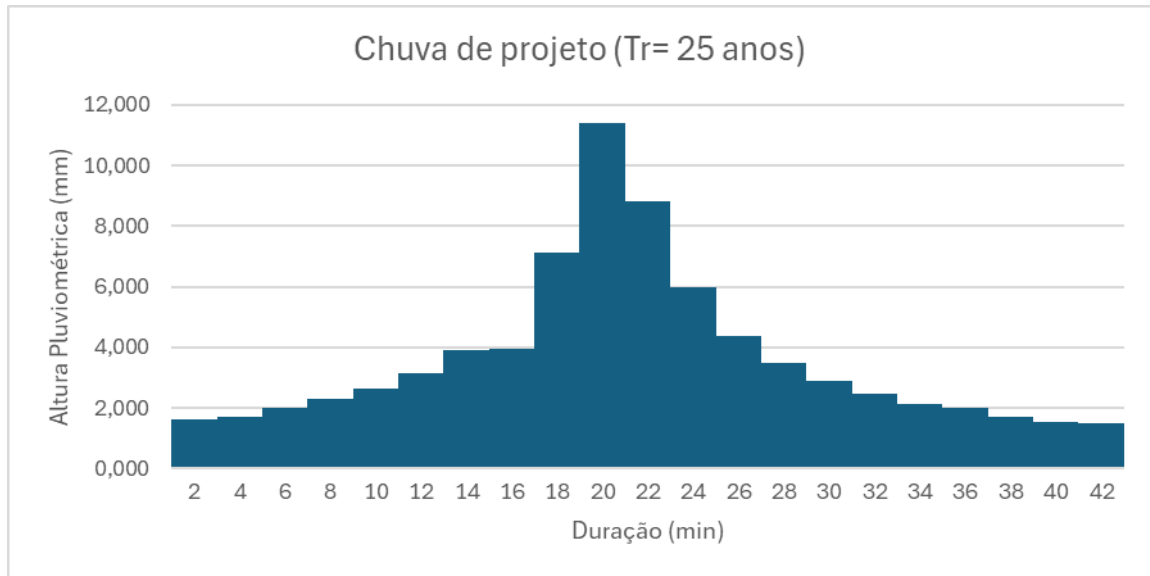
Pacum é a precipitação acumulada dado em milímetro;

Pdesac é a precipitação desacumulada dado em milímetro;

Prearr é a precipitação rearrumada conforme o método dos blocos alternados.

4.4.2.4.1 Hietograma (Tr) 25 anos

Figura 17 - Hietograma Tr = 25 anos



Fonte: Autor (2024)

4.4.2.5 Tempo de Retorno (Tr) 50 anos

Tabela 12 - Chuva de projeto - Tr 50 = anos - Blocos alternados

Duração (min)	42,00	Intervalo de tempo (min):	2,00	Nº de Intervalos:	21	Tempo de retorno (anos)	50
Tempo (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	Pdesac (mm)	Ordem Crescente	Ordem Alternada	Prearr (mm)	
2	367,241	12,853	12,853	1	19	1,838	
4	325,929	22,815	9,962	2	17	1,930	
6	294,074	30,878	8,063	3	15	2,279	
8	268,664	37,613	6,735	4	13	2,592	
10	252,468	42,078	4,465	5	11	3,005	
12	235,147	47,029	4,951	6	9	3,572	
14	220,374	51,421	4,391	7	7	4,391	
16	207,606	55,361	3,941	8	5	4,465	
18	196,444	58,933	3,572	9	3	8,063	
20	186,593	62,198	3,264	10	1	12,853	
22	177,826	65,203	3,005	11	2	9,962	
24	169,965	67,986	2,783	12	4	6,735	
26	162,873	70,578	2,592	13	6	4,951	
28	156,437	73,004	2,426	14	8	3,941	
30	150,567	75,283	2,279	15	10	3,264	

32	144,930	77,537	2,254	16	12	2,783
34	140,237	79,468	1,930	17	14	2,426
36	135,664	81,399	1,931	18	16	2,254
38	131,427	83,237	1,838	19	18	1,931
40	127,486	84,991	1,754	20	20	1,754
42	123,811	86,668	1,677	21	21	1,677

Fonte: Autor (2024)

Onde:

I é a intensidade pela fórmula IDF de Teresina/PI em milímetro por hora;

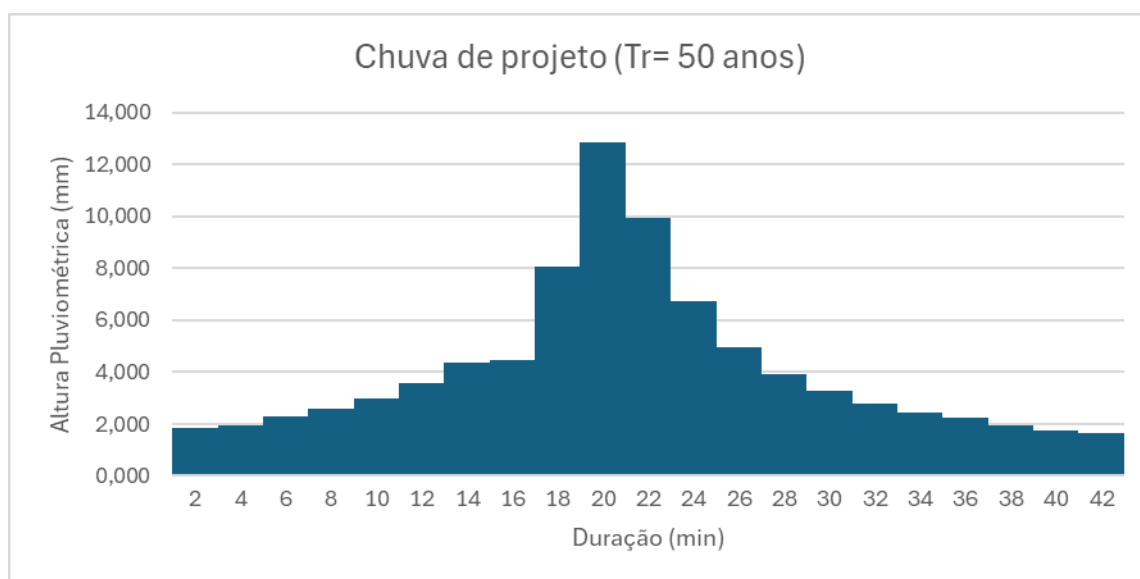
Pacum é a precipitação acumulada dado em milímetro;

Pdesac é a precipitação desacumulada dado em milímetro;

Prearr é a precipitação rearrumada conforme o método dos blocos alternados.

4.4.2.5.1 Hietograma (Tr) 50 anos

Figura 18 - Hietograma Tr 50 = anos



Fonte: Autor (2024)

4.4.2.6 Tempo de Retorno (Tr) 100 anos

Tabela 13 - Chuva de projeto - Tr = 100 anos - Blocos alternados

Duração (min)	42,00	Intervalo de tempo (min):	2,00	Nº de Intervalos:	21	Tempo de retorno (anos)	100
Tempo (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	Pdesac (mm)	Ordem Crescente	Ordem Alternada	Prearr (mm)	
2	414,258	14,499	14,499	1	19	2,073	
4	367,656	25,736	11,237	2	17	2,177	
6	331,723	34,831	9,095	3	15	2,571	
8	303,060	42,428	7,598	4	13	2,924	
10	284,791	47,465	5,037	5	11	3,390	
12	265,252	53,050	5,585	6	9	4,029	
14	248,588	58,004	4,953	7	7	4,953	
16	234,184	62,449	4,445	8	5	5,037	
18	221,594	66,478	4,029	9	3	9,095	
20	210,482	70,161	3,682	10	1	14,499	
22	200,592	73,550	3,390	11	2	11,237	
24	191,725	76,690	3,140	12	4	7,598	
26	183,725	79,614	2,924	13	6	5,585	
28	176,465	82,350	2,736	14	8	4,445	
30	169,843	84,921	2,571	15	10	3,682	
32	163,484	87,464	2,543	16	12	3,140	
34	158,191	89,641	2,177	17	14	2,736	
36	153,033	91,820	2,178	18	16	2,543	
38	148,252	93,893	2,073	19	18	2,178	
40	143,808	95,872	1,978	20	20	1,978	
42	139,663	97,764	1,892	21	21	1,892	

Fonte: Autor (2024)

Onde:

I é a intensidade pela fórmula IDF de Teresina/PI em milímetro por hora;

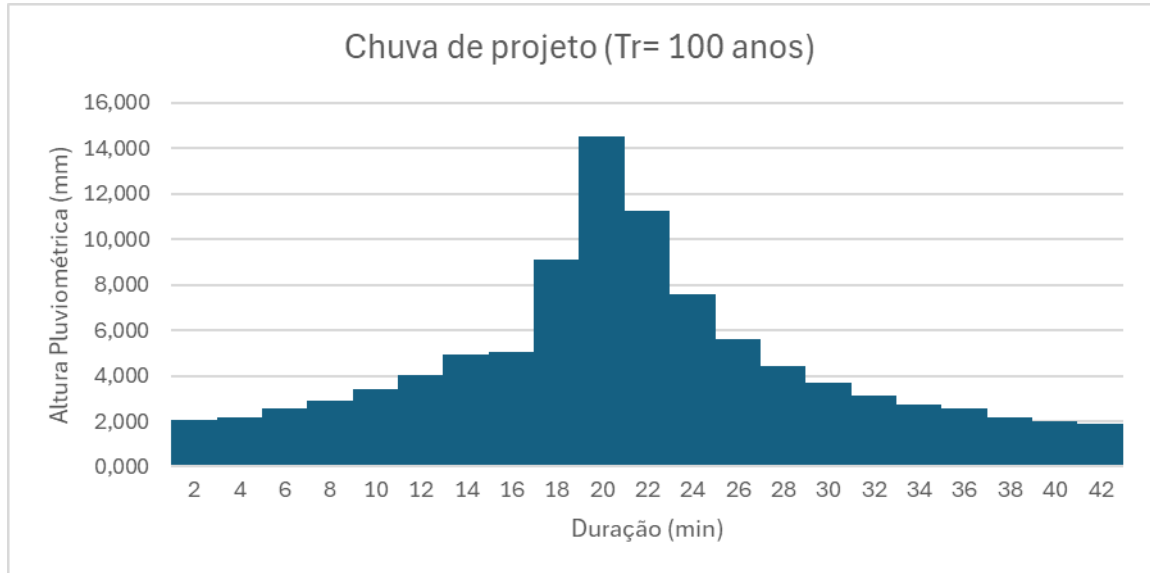
Pacum é a precipitação acumulada dado em milímetro;

Pdesac é a precipitação desacomulada dado em milímetro;

Prearr é a precipitação rearrumada conforme o método dos blocos alternados.

4.4.2.6.1 Hietograma (Tr) 100 anos

Figura 19 - Hietograma Tr = 100 anos



Fonte: Autor (2024)

4.4.3 Parâmetros para cálculo de vazão de pico e modelagem do escoamento

Tabela 14 - Parâmetros para cálculo de vazão de pico e Modelagem do escoamento

Sub-Bacia	Área (m²)	Área (Km²)	Tc (min)	Lag Time (min)	CN	% IMP	S (mm)	IA (mm)
PD14	4.250.228,962	4,250	42,00	25,2	88,5	76,998%	33,01	6,60

Fonte: Autor (2024)

Onde:

Tc é o tempo de concentração da sub-bacia PD14;

Lag Time é tempo de retardo do escoamento superficial na superfície da Sub-bacia PD14;

CN é o parâmetro do método *Curve Number*, adimensional;

%IMP é o percentual impermeável da Sub-bacia PD14 em percentual;

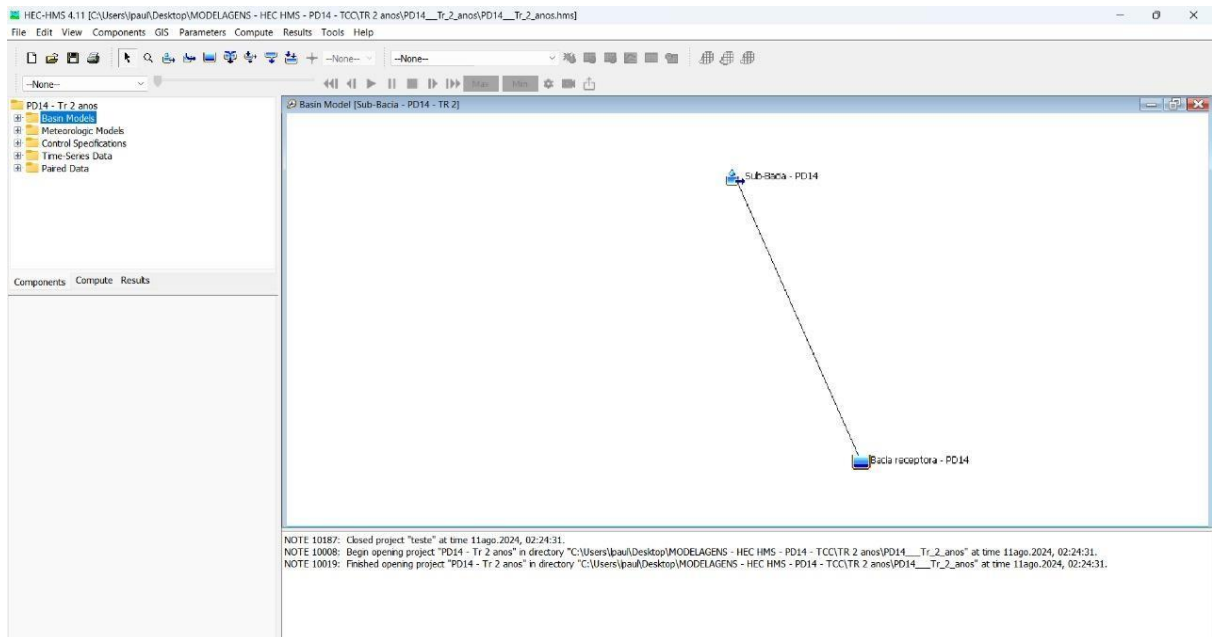
S é a retenção potencial máxima da Sub-bacia PD14 em milímetro;

IA é a abstração inicial apontado pelo método do SCS em milímetro.

4.5 Simulação hidrológica no HEC-HMS

4.5.1 Interface do HEC-HMS

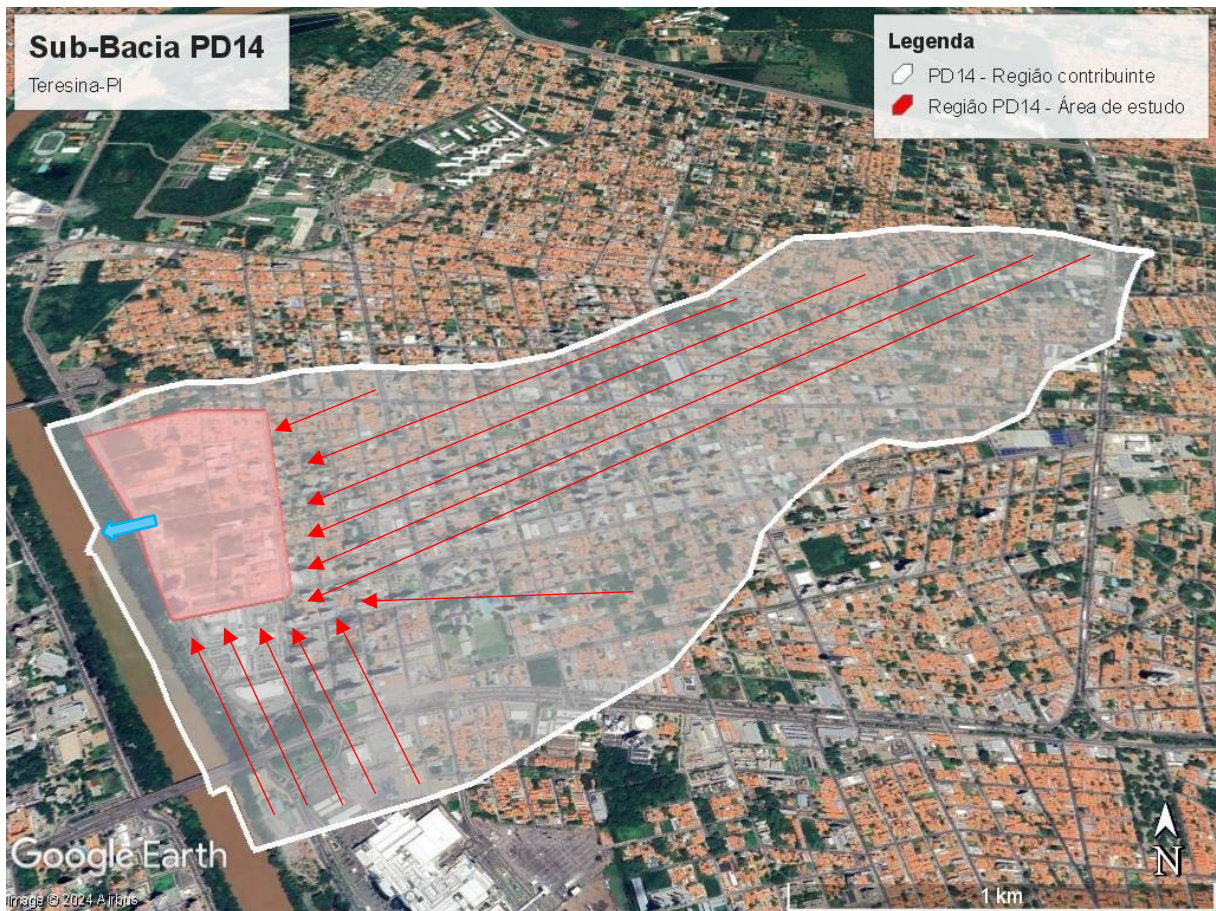
Figura 20 - Interface do HEC-HMS



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

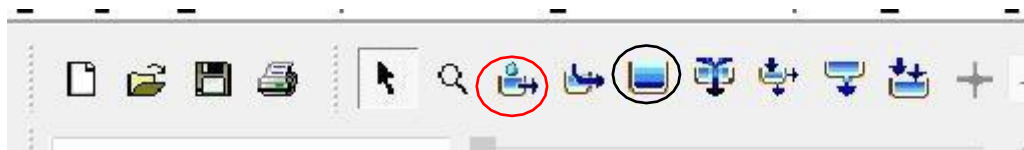
A interface do HEC-HMS é intuitiva e de fácil entendimento. Para o presente projeto foi configurado o dispositivo de captação e geração da vazão diante dos diversos tempos de retorno, Sub-Bacia PD14, assim como a precipitação, modelo meteorológico, meio de extravasão e região da sub-bacia PD14 que funcionará como reservatório de detenção, devido à sua localização e cota, assim como o dispositivo de extravasão em azul, como disposto no tópico 4.1.1 e a seguir, Figura 21.

Figura 21 – Área de estudo e funcionamento da modelagem



Fonte: Google Earth Pro (2024)

Figura 22 - Dispositivos para configuração

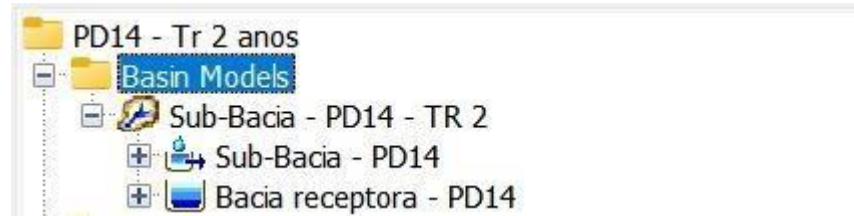


Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Na figura 22 foi circundado os dispositivos que serão configurados e utilizados no estudo. Em vermelho é o a Sub-Bacia PD14 e em preto é o reservatório.

4.5.2 Configuração – Sub-bacia PD14

Figura 23 - Lista de modelos configurados



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Ao iniciar-se a modelagem o software vai adicionando numa janela lateral, como um menu, sempre ligando os itens conforme funcionam a ordem de acontecimentos, na figura 23 consegue-se observar a região da sub-bacia PD14 e Bacia receptora, ou área de estudo.

Figura 24 - Configuração da Sub-bacia PD14

Subbasin		Loss	Transform	Options
Basin Name: Sub-Bacia - PD14 - TR 2				
Element Name: Sub-Bacia - PD14				
Description:				
Downstream:	Bacia receptora - PD14			
*Area (KM2)	4.25			
Latitude Degrees:				
Longitude Degrees:				
Discretization Method:	--None---			
Canopy Method:	--None--			
Snow Method:	--None--			
Surface Method:	--None--			
Loss Method:	SCS Curve Number			
Transform Method:	SCS Unit Hydrograph			
Baseflow Method:	--None--			

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Os dados de entrada para modelagem da sub-bacia PD14 foram apontados, assim como o método que será gerado o hidrograma, método *SCS Curve number*.

4.5.3 Configuração – Reservatório, área de estudo

Para configuração do reservatório, ou região de detenção, foi configurado suas informações, como, cotas e capacidade de volume.

Figura 25 - Configuração do Reservatório

Reservoir Options	
Basin Name:	Sub-Bacia - PD14 - TR 2
Element Name:	Bacia receptora - PD14
Description:	
Downstream:	--None--
Method:	Outflow Structures
Storage Method:	Elevation-Storage
*Elev-Stor Function:	Cota X Volume
Initial Condition:	Elevation
*Initial Elevation (M)	61
Main Tailwater:	Assume None
Auxiliary:	--None--
Time Step Method:	Automatic Adaption
Outlets:	
Spillways:	
Dam Tops:	
Pumps:	

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Foi informado a cota mais baixa e o meio de entrada das informações, aparecem como *Elevation-Storage*, Elevação e reservatório, logo, Cota X Volume.

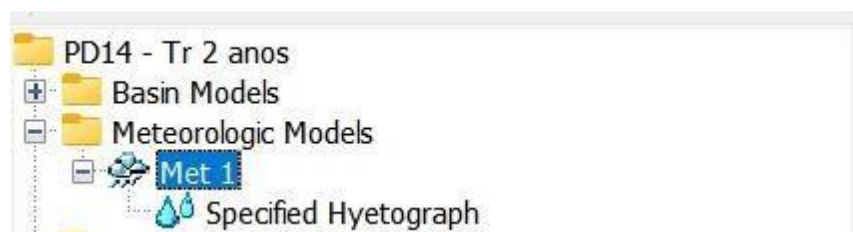
Figura 26 - Configuração do reservatório, Cota X Volume

Paired Data		Table	Graph
Elevation (M)		Storage (1000 M3)	
61		0.00	
62		14.30	
63		83.39	
64		261.63	
65		475.85	
66		718.64	
67		981.03	
68		1258.39	
69		1551.02	
70		1856.79	
71		2178.18	
72		2510.18	
73		2853.90	
74		3207.02	
75		3565.36	

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Tabela Cota X Volume da área de estudo, modelado como reservatório de detenção.

Figura 27 - Configuração do Modelo meteorológico



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Foi gerado também o modelo meteorológico que foi especificado como modelo hietograma pelo método dos blocos alternados, de acordo com o tempo de retorno -

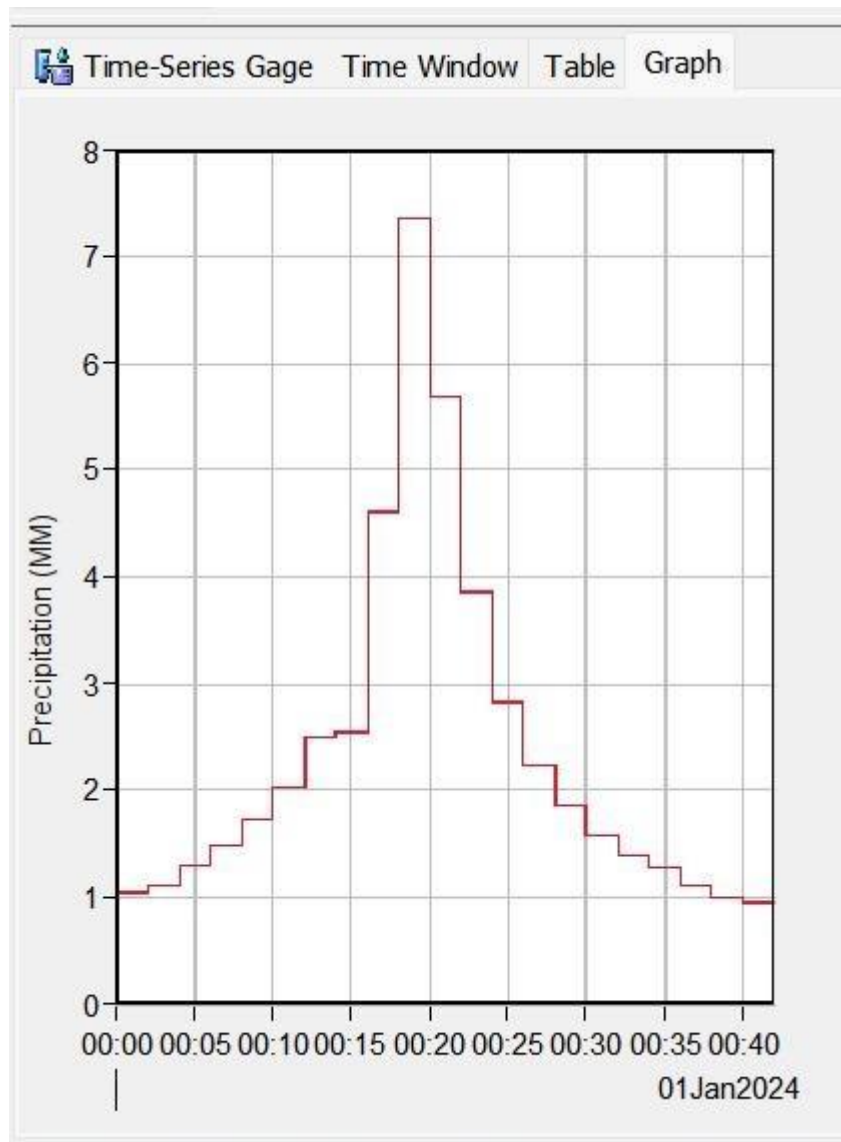
TR e o meio controle como especificação do tempo e sistema de extravasão.

Figura 28 - Configuração da precipitação no tempo

Time-Series Gage Time Window Table Graph	
Time (ddMMYYYY, HH...	Precipitation (MM)
01jan.2024, 00:00	
01jan.2024, 00:02	1.051
01jan.2024, 00:04	1.103
01jan.2024, 00:06	1.303
01jan.2024, 00:08	1.482
01jan.2024, 00:10	1.717
01jan.2024, 00:12	2.041
01jan.2024, 00:14	2.510
01jan.2024, 00:16	2.552
01jan.2024, 00:18	4.608
01jan.2024, 00:20	7.346
01jan.2024, 00:22	5.693
01jan.2024, 00:24	3.849
01jan.2024, 00:26	2.830
01jan.2024, 00:28	2.252
01jan.2024, 00:30	1.866
01jan.2024, 00:32	1.591
01jan.2024, 00:34	1.386
01jan.2024, 00:36	1.288

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 29 - Gráfico do hietograma gerado pelo HEC-HMS



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

O HEC-HMS gera o próprio gráfico com base no método utilizado, no caso do presente estudo, método dos blocos alternados que é característico pelo pico da precipitação centralizado no eixo X (tempo).

Figura 30 - Dispositivo de extravasão do reservatório



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Para o dispositivo de extravasão, foi possível identificar in loco duas bocas de lobo que estão em pleno funcionamento. Dispositivo com diâmetro de 1,5m.

Figura 31 - Configuração do dispositivo de extravasão

Reservoir	Outlet 1	Options
Basin Name: Sub-Bacia - PD14 - TR 2		
Element Name: Bacia receptora - PD14		
Method:	Orifice Outlet	
Direction:	Main	
Number Barrels:	2	
Center Elevation (M)	61.75	
Area (M2)	1.77	
Coefficient:	0.65	

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

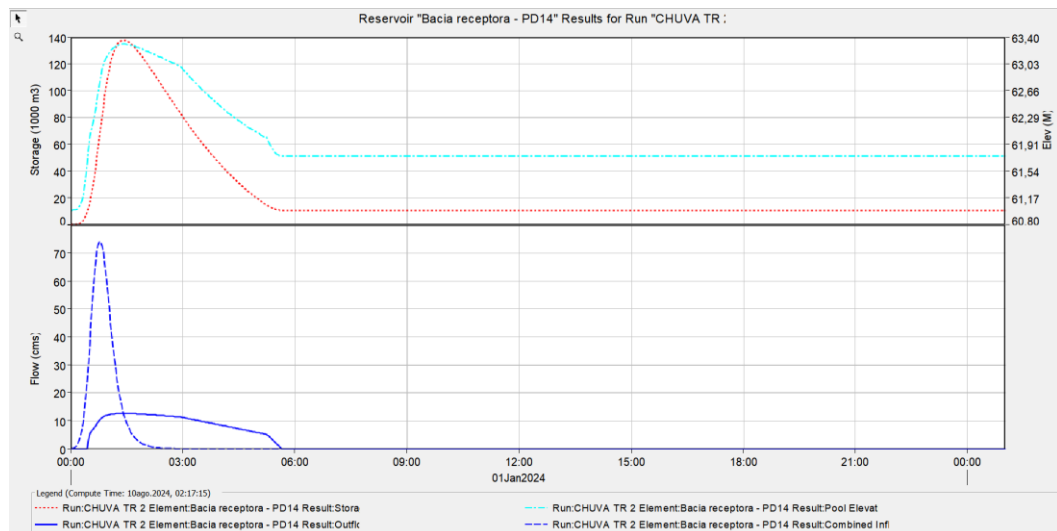
A modelagem do sistema de extravasão foi modelado a partir do número de dispositivos, Number Barrels, a cota central dos tubos, Center Elevation e área das bocas de lobo.

Após finalizada a configuração é possível rodar a modelagem e obter os resultados.

5 Resultados

5.1 Precipitação com $Tr = 2$ anos

Figura 32 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com $Tr = 2$ anos



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 33 - Tabela resumo de teste em 1000m³ - $Tr = 2$ anos

Project: PD14 - Tr 2 anos		Simulation Run: CHUVA TR 2	
Reservoir: Bacia receptora - PD14			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	Sub-Bacia - PD14 - TR 2
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:40:58	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	73.978 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	12.711 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:24
Inflow Volume:	185.813 (1000 M3)	Peak Storage:	137.912 (1000 M3)
Discharge Volume:	175.109 (1000 M3)	Peak Elevation:	63.306 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 34 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 2 anos

Project: PD14 - Tr 2 anos Simulation Run: CHUVA TR 2			
Reservoir: Bacia receptora - PD14			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	Sub-Bacia - PD14 - TR 2
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:17:15	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	73.978 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	12.711 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:24
Inflow Volume:	43.721 (MM)	Peak Storage:	137.912 (1000 M3)
Discharge Volume:	41.202 (MM)	Peak Elevation:	63.306 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

5.1.1 Mapa de Inundação

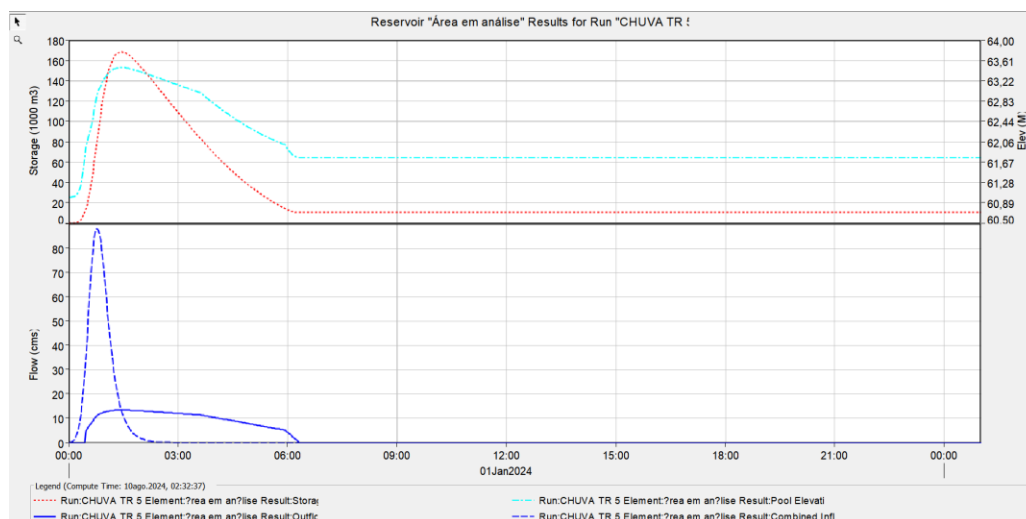
Figura 35 - Mancha de inundação - Tr = 2 anos



Fonte: Google Earth Pro (2024)

5.2 Precipitação com Tr = 5 anos

Figura 36 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com Tr = 5 anos



Fonte: Autor (2024); HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 37 - Tabela resumo de teste em 1000m³ - Tr = 5 anos

Project: PD14 - Tr 5 anos Simulation Run: CHUVA TR 5			
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 5
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:32:37	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	87.969 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	13.391 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:26
Inflow Volume:	220.735 (1000 M3)	Peak Storage:	168.365 (1000 M3)
Discharge Volume:	209.920 (1000 M3)	Peak Elevation:	63.477 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 38 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 5 anos

Project: PD14 - Tr 5 anos Simulation Run: CHUVA TR 5			
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 5
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:32:37	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	87.969 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	13.391 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:26
Inflow Volume:	51.938 (MM)	Peak Storage:	168.365 (1000 M3)
Discharge Volume:	49.393 (MM)	Peak Elevation:	63.477 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

5.2.1 Mapa de inundação

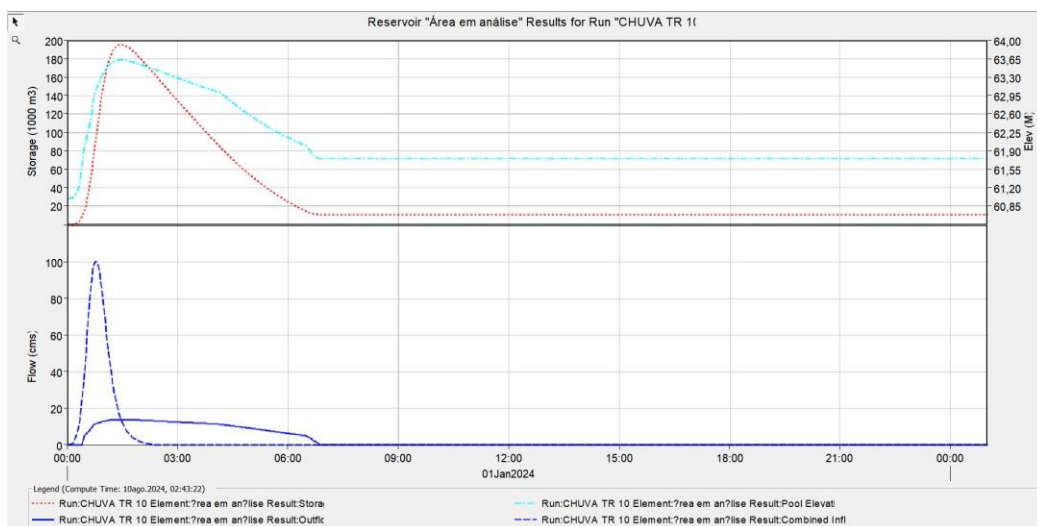
Figura 39 - Mancha de inundação - Tr = 5 anos



Fonte: Google Earth Pro (2024)

5.3 Precipitação com Tr = 10 anos

Figura 40 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com Tr = 10 anos



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 41 - Tabela resumo de teste em 1000m³ - Tr = 10 anos

Project: PD14 - Tr 10 anos Simulation Run: CHUVA TR 10			
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 10
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:43:22	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	100.227 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	13.965 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:28
Inflow Volume:	251.322 (1000 M3)	Peak Storage:	195.341 (1000 M3)
Discharge Volume:	240.638 (1000 M3)	Peak Elevation:	63.628 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

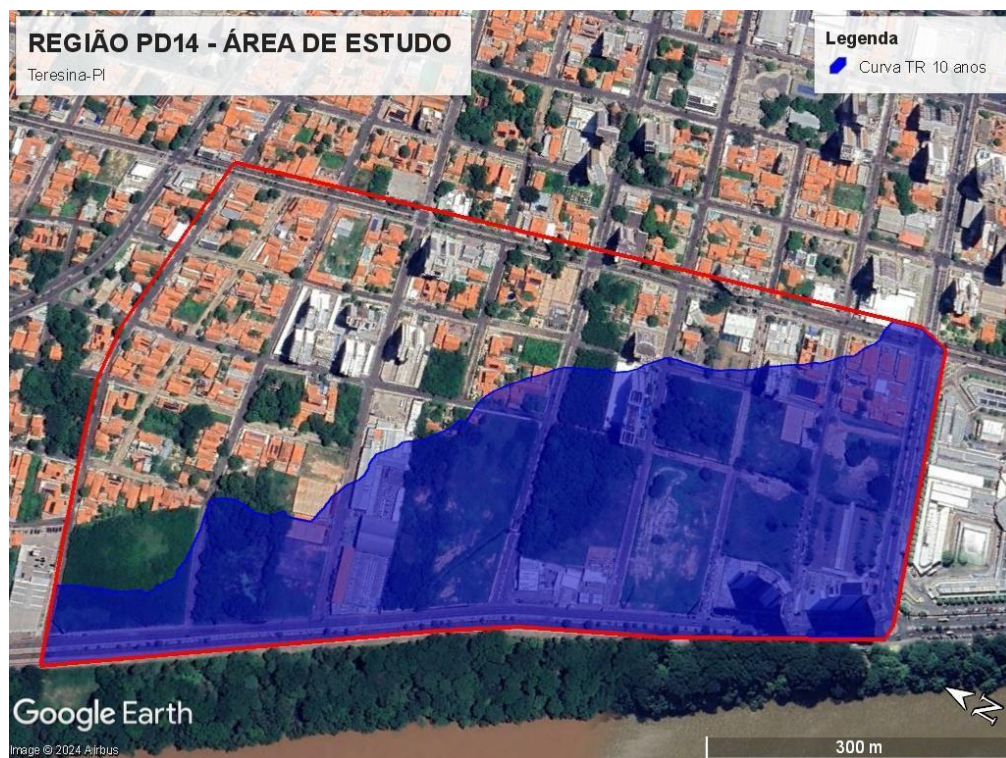
Figura 42 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 10 anos

Project: PD14 - Tr 10 anos Simulation Run: CHUVA TR 10			
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 10
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:43:22	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	100.227 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	13.965 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:28
Inflow Volume:	59.135 (MM)	Peak Storage:	195.341 (1000 M3)
Discharge Volume:	56.621 (MM)	Peak Elevation:	63.628 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

5.3.1 Mapa de inundação

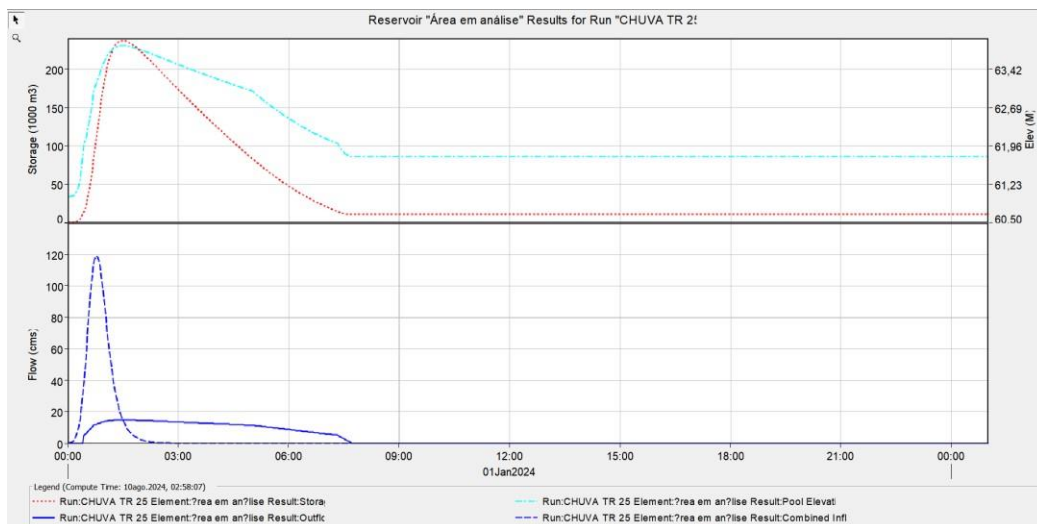
Figura 43 - Mancha de inundação - Tr 10 = anos



Fonte: Google Earth Pro (2024)

5.4 Precipitação com $Tr = 25$ anos

Figura 44 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com $Tr = 25$ anos



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 45 - Tabela resumo de teste em 1000m³ - $Tr = 25$ anos

Project: PD14 - Tr 25 anos		Simulation Run: CHUVA TR 25	
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 25
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:58:07	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	118.986 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	14.809 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:30
Inflow Volume:	298.128 (1000 M3)	Peak Storage:	237.031 (1000 M3)
Discharge Volume:	287.331 (1000 M3)	Peak Elevation:	63.862 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

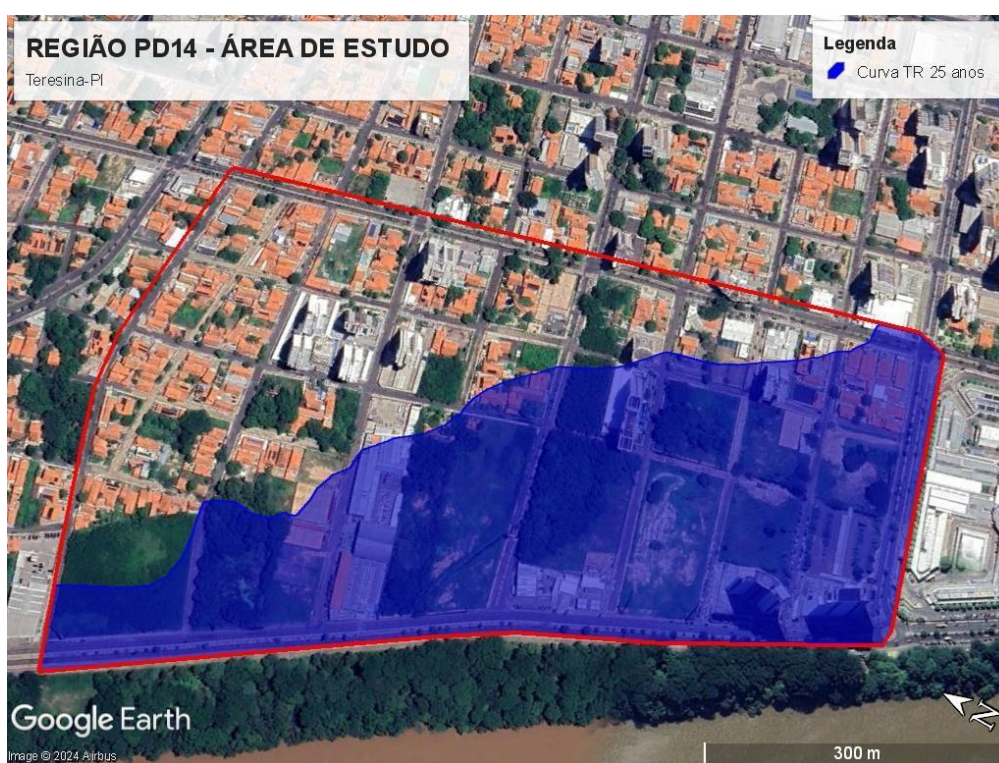
Figura 46 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 25 anos

Project: PD14 - Tr 25 anos Simulation Run: CHUVA TR 25			
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 25
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:58:07	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	118.986 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	14.809 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:30
Inflow Volume:	70.148 (MM)	Peak Storage:	237.031 (1000 M3)
Discharge Volume:	67.607 (MM)	Peak Elevation:	63.862 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

5.4.1 Mapa de inundação

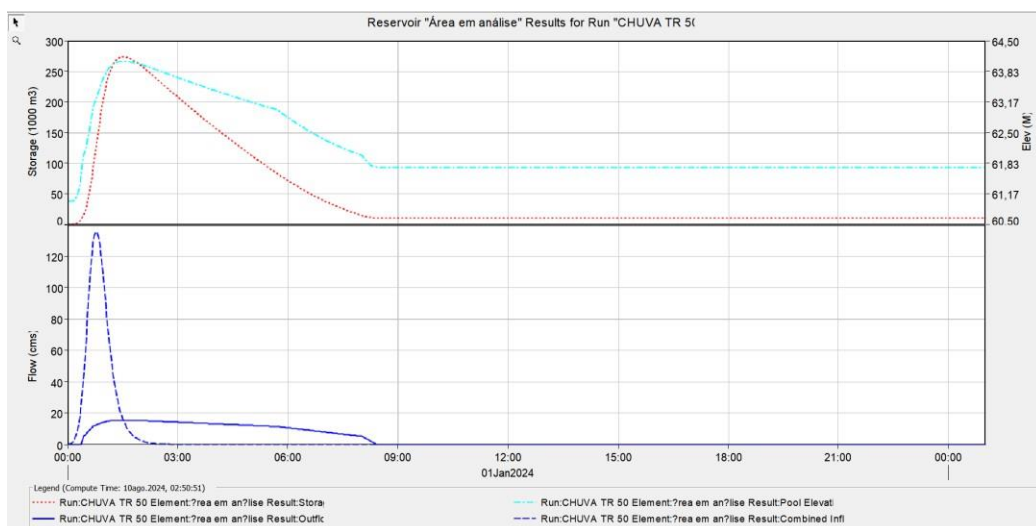
Figura 47 - Mancha de inundação - Tr = 25 anos



Fonte: Google Earth Pro (2024)

5.5 Precipitação com $Tr = 50$ anos

Figura 48 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com $Tr = 50$ anos



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 49 - Tabela resumo de teste em 1000m³ - $Tr = 50$ anos

Project: PD14 - Tr 50 anos Simulation Run: CHUVA TR 50			
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 50
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:50:51	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	135.374 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	15.477 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:30
Inflow Volume:	339.021 (1000 M3)	Peak Storage:	273.797 (1000 M3)
Discharge Volume:	328.336 (1000 M3)	Peak Elevation:	64.057 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 50 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 50 anos

Project: PD14 - Tr 50 anos Simulation Run: CHUVA TR 50			
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 50
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 02:50:51	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	135.374 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	15.477 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:30
Inflow Volume:	79.770 (MM)	Peak Storage:	273.797 (1000 M3)
Discharge Volume:	77.255 (MM)	Peak Elevation:	64.057 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

5.5.1 Mapa de inundação

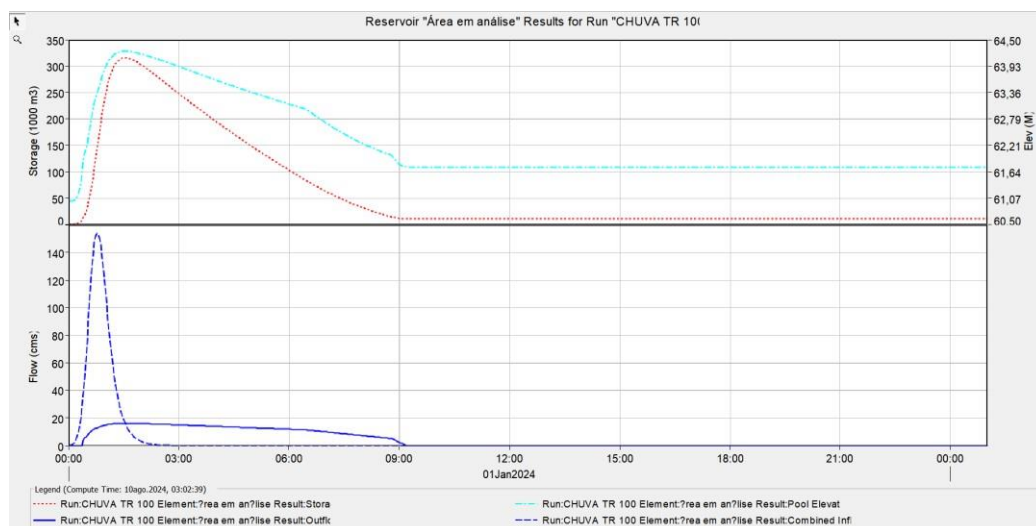
Figura 51 - Mancha de inundação - Tr = 50 anos



Fonte: Google Earth Pro (2024)

5.6 Precipitação com $Tr = 100$ anos

Figura 52 - Gráficos Cota x Volume e Fluxo de precipitação no tempo com $Tr = 100$ anos



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Figura 53 - Tabela resumo de teste em 1000m³ - $Tr = 100$ anos

Project:PD14 - Tr 100 anos				Simulation Run: CHUVA TR 100	
Reservoir:Área em análise					
Start of Run:		01jan.2024, 00:00		Basin Model: PD14 - TR 100	
End of Run:		02jan.2024, 01:00		Meteorologic Model: Met 1	
Compute Time:		10ago.2024, 03:02:39		Control Specifications:Control 1	
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3					
Computed Results					
Peak Inflow:		153.932 (M3/S)		Date/Time of Peak Inflow: 01jan.2024, 00:46	
Peak Discharge:		16.123 (M3/S)		Date/Time of Peak Discharge:01jan.2024, 01:32	
Inflow Volume:		385.337 (1000 M3)		Peak Storage: 315.892 (1000 M3)	
Discharge Volume:		374.613 (1000 M3)		Peak Elevation: 64.253 (M)	

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

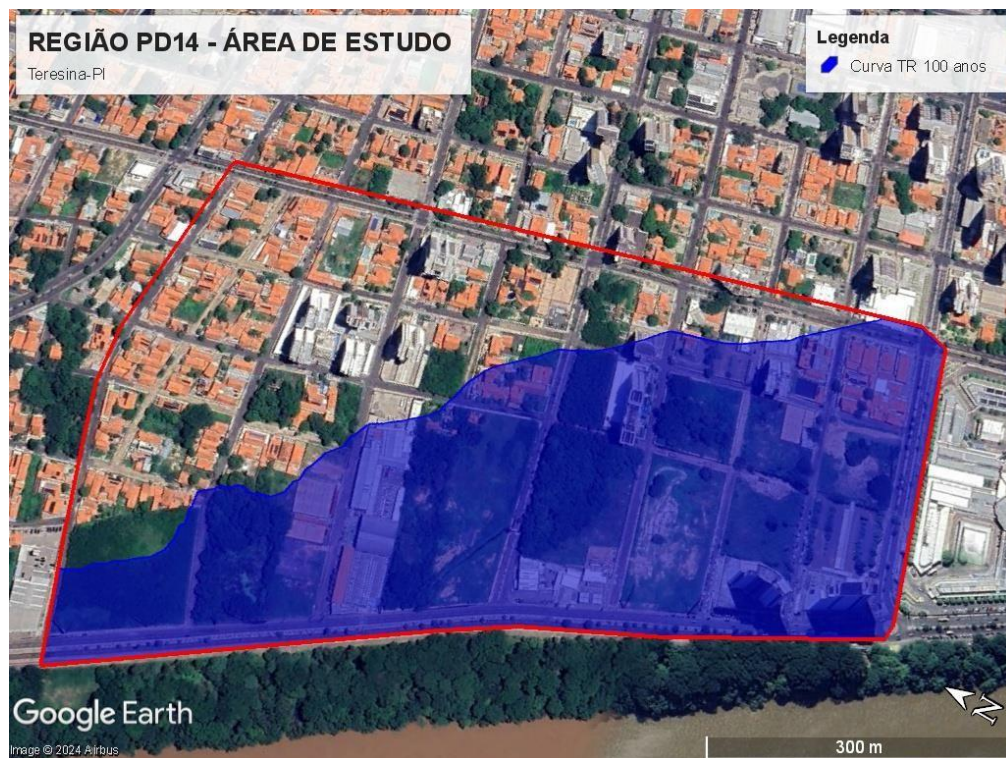
Figura 54 - Tabela resumo de teste em milímetro - Tr = 100 anos

Project: PD14 - Tr 100 anos Simulation Run: CHUVA TR 100			
Reservoir: Área em análise			
Start of Run:	01jan.2024, 00:00	Basin Model:	PD14 - TR 100
End of Run:	02jan.2024, 01:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	10ago.2024, 03:02:39	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	153.932 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	01jan.2024, 00:46
Peak Discharge:	16.123 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01jan.2024, 01:32
Inflow Volume:	90.668 (MM)	Peak Storage:	315.892 (1000 M3)
Discharge Volume:	88.144 (MM)	Peak Elevation:	64.253 (M)

Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

5.6.1 Mapa de inundação

Figura 55 - Mancha de inundação - Tr = 100 anos

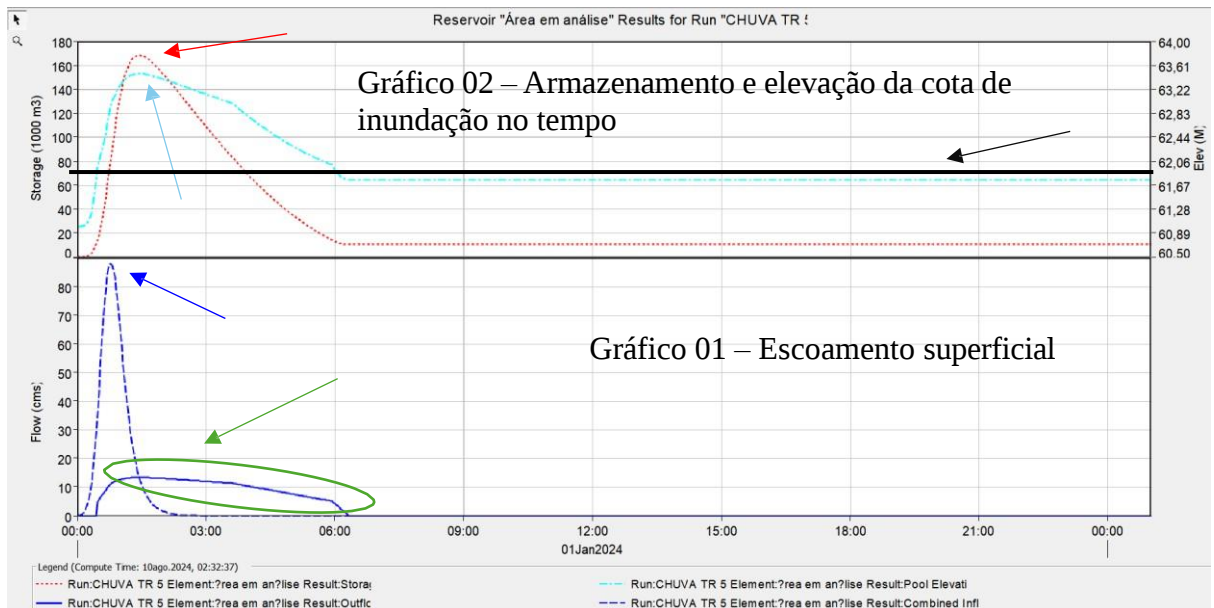


Fonte: Google Earth Pro (2024)

5.7 Análise dos resultados

5.7.1 Análise dos gráficos

Figura 56 - Gráficos Cota x Volume e Escoamento superficial com Tr = 5 anos para análise



Fonte: HEC-HMS Versão 4.11 (2024)

Para um melhor entendimento dos resultados, na figura 56 temos dois gráficos:

Gráfico 01: Representando o escoamento superficial ao longo do tempo, apontado pela seta azul marinho temos o escoamento pela sub-bacia PD14 sem dispositivo de retenção e apontado pela seta verde temos o hidrograma gerado na sub-bacia PD14, porém agora amortecido quando entra na área de estudo, representando a real situação do presente estudo.

Gráfico 02: Representando duas informações, apontado pela seta vermelha o armazenamento da precipitação no tempo e indicado pela seta azul clara a elevação da cota de inundação dentro do dispositivo de retenção, que foi modelado com dispositivo de extravasão, atualmente existente.

Para quesito de melhor entendimento, foi adicionado uma linha na cor preta que indica a cota central das bocas de lobo existentes.

5.7.2 Análise das vazões, cotas de inundações e volume gerados no estudo

Tabela 15 - Resumo de resultados críticos das modelagens

Tr	T(h)	Qi (m³/s)	V (1000 m³)	Cota do Terreno (m)	Cota do centro do extravasor (m)	Cota da lâmina de água (m)	Altura da lâmina de água (m)	Qf (m³/s)
2 Anos	01:24	13,150	137,912	61,000	61,75	63,306	2,306	12,711
5 Anos	01:26	13,752	168,365	61,000	61,75	63,477	2,477	13,391
10 Anos	01:28	13,777	195,341	61,000	61,75	63,628	2,628	13,965
25 Anos	01:30	14,367	237,031	61,000	61,75	63,862	2,862	14,809
50 Anos	01:32	14,363	273,781	61,000	61,75	64,057	3,057	15,477
100 Anos	01:34	14,348	315,797	61,000	61,75	64,253	3,253	16,122

Fonte: Autor (2024)

Onde:

Tr é o tempo de retorno das precipitações analisadas;

T(h) é o tempo do pico das modelagens;

Qi (m³/s) é a vazão de entrada em seu maior volume;

V (1000m³) é o volume acumulado no reservatório;

Cota do terreno em metro;

Cota do centro do extravasor em metro.

Cota da lâmina de água em metro;

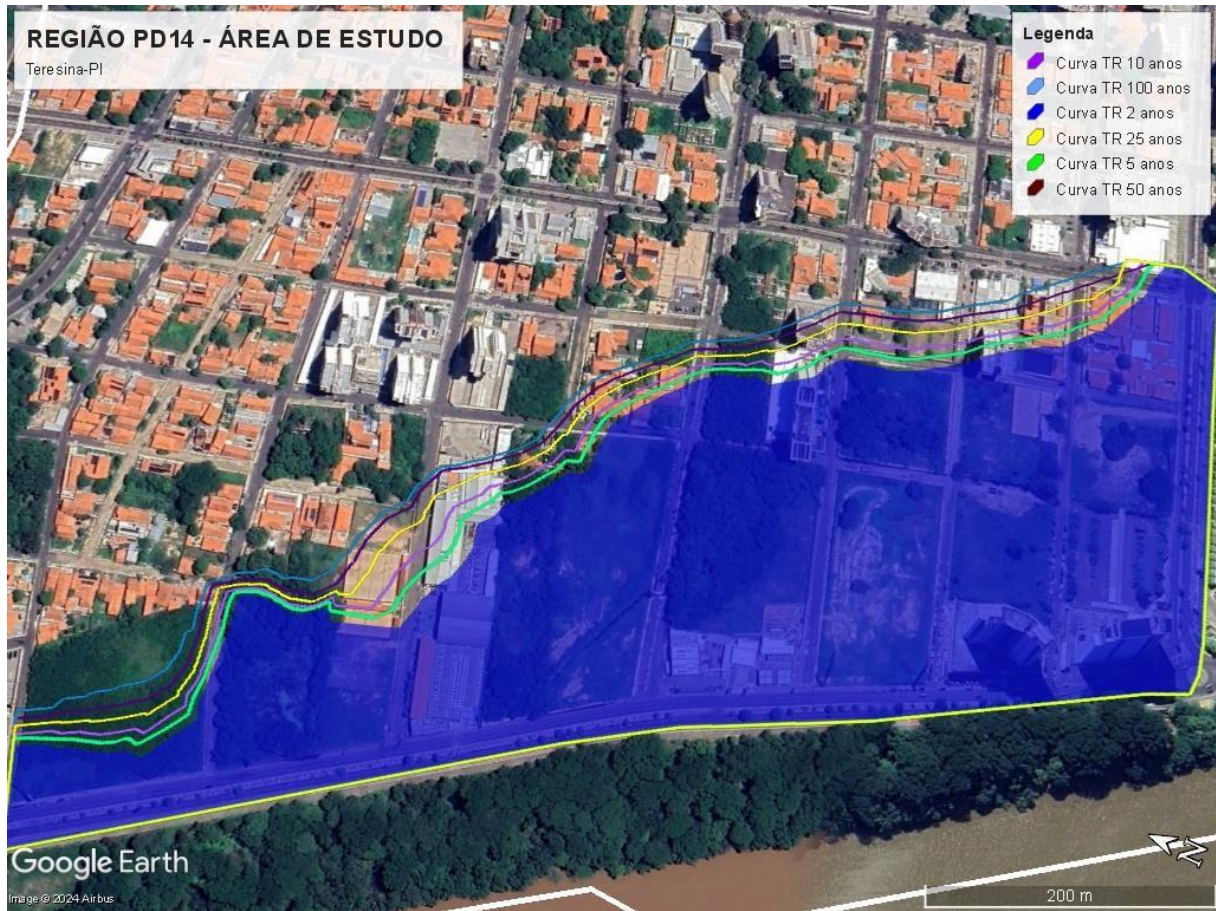
Altura da lâmina de água em metro;

Qf (m³/s) é a vazão de saída no extravasor.

Analisando os resultados na tabela 15 é possível perceber que em todas as situações houve um acúmulo considerável de água, mesmo para Tr = 2 anos. Fato ocorreu devido à baixa vazão pelo extravasor, que mesmo atuando 100% não conseguiu suprir a necessidade, gerando acúmulo de água.

5.7.3 Análise dos mapas de alagamentos

Figura 57 - Sobreposição de manchas de inundações analisadas



Fonte: Google Earth Pro (2024)

Tabela 16 - Comparativo de resultados das manchas de inundações

Tr	Cota do Terreno (m)	Cota da lâmina de água (m)	Área inundada (m²)	Diferença de volume
2 Anos	61,000	63,306	169,55	00
5 Anos	61,000	63,477	177,30	7,75
10 Anos	61,000	63,628	184,05	7,75
25 Anos	61,000	63,862	194,04	9,99
50 Anos	61,000	64,057	201,67	7,63
100 Anos	61,000	64,253	208,43	6,76

Fonte: Autor (2024)

Diante da figura 57 consegue-se identificar que grande parte da área de retenção foi inundada, havendo uma variação de 47% à 58%, aproximadamente, da

área, fator que acarretou alagamento em áreas que hoje há residências e comércios.

6 Conclusões

6.1 Análise e conclusão

Após as modelagens, análises dos hidrogramas e mapas das manchas de inundações foi possível identificar que em todas as situações houve acúmulo em excesso de precipitação, não tendo vazão o suficiente pelo dispositivo que atualmente está construído no local. A vazão em sua maioria é devido ao grande percentual de impermeabilidade do solo e grande área de contribuição da sub-bacia PD14 estudada, uma vez que até para $Tr = 2$ anos o sistema que foi utilizado na modelagem não foi eficiente.

Foi possível analisar também que o pico das precipitações foi retardado e o tempo estendido, figura 56, gráfico 01, devido a presença do “reservatório”, ou região de retenção, fator que está dentro do requisito pelo Lei Complementar Nº 6105/2024, “Art. 8º É obrigatória, por parte do empreendedor, a implantação de sistema para a captação e retenção de águas pluviais, coletadas por telhados, coberturas, terraços e pavimentos descobertos, em lotes edificadas, que tenham área impermeabilizada superior a $750m^2$ ”. Uma obra civil, estaria dentro do critério com área impermeável superior a $750m^2$, logo, deve haver previsão de dispositivo de retenção para que não haja alagamento, no entanto, devido à insuficiência do dispositivo presente, utilizado na modelagem da região exutória não foi possível evitar que a lâmina de água atingisse alarmantes alturas, mesmo com precipitação com $Tr=2$ anos, chegando a 2,30m à $Tr=100$ anos, atingindo aprox. 3,25m.

6.2 Aplicação do estudo na construção civil

A metodologia adotada no presente estudo é de fácil aplicação na construção civil, uma vez que toda obra deve haver estudo de viabilidade técnica e um dos critérios é o estudo de impacto ambiental, sendo necessário a análise da cota do terreno submetido a previsão de precipitação com determinados tempos de retorno. Utilizando o modelo do presente estudo é possível prever a cota de inundação com base na modelagem solicitada, logo, a construção será executada numa cota superior

ou prevê a construção de dispositivos de detenção e dispositivo de extravasão para que a lâmina de água não atinja cota indesejada para a precipitação modelada no devido tempo de retorno.

6.3 Conclusão

Diante dos resultados obtidos no presente estudo pode-se observar e validar o método adotado. A utilização da classificação de imagem de satélite, análise da morfologia de uma determinada região e o geoprocessamento para análise e geração das manchas de inundação, assim como precipitações e volumes gerados, acarretando importância na utilização dos modelos digitais de terrenos na construção civil auxiliando na tomada de decisão, podendo assim mitigar grande tragédias e imprevistos, buscando a durabilidade, confiabilidade e segurança nas obras.

– Referências

- ARNOLD, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., . . . Jha, M. K. (2019). **SWAT: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE.** doi:10.13031/2013.42256
- BEVEN, K. (31 de Março de 2001). **How far can we go in distributed hydrological modelling?** *Hydrology and Earth System Sciences*, 5, 1–12. doi:doi.org/10.5194/hess-5-1-2001
- BRASIL. (2007). **Como Agir Inundação.** pp. 1 - 3. Acesso em 03 de Julho de 2024, disponível em Defesa Civil: <https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Como%20Agir/Inunda%C3%A7%C3%A3o.pdf>
- CANHOLI, A. P. (2015). **Drenagem urbana e controle de enchentes** (2 ed ed.). São Paulo: Oficina de Textos. ISBN 978-85-7975-160-8
- CHAPLOT, V., Meddi, M., Boulet, G., & Cerdan, O. (2015). **Soil and Water Assessment Tool to simulate runoff and erosion in the Kamech catchment (Tunisia): calibration and validation.** Hydrological Processes.
- CHOW, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). **Applied Hydrology.** (S. i. engineering, Ed.) Mc-Graw Hill International Editions: Civil Engineering Series. doi:ISBN 0-07-010810-2
- CIDADEVERDE. (2009). **Rio pode transbordar; cota é comparada a cheia de 1985.** Acesso em 26 de Novembro de 2023, disponível em Cidade Verde: <https://cidadeverde.com/noticias/36935/rio-pode-transbordar-cota-e-comparada-a-cheia-de-1985>
- CODEVASF. (2016). **Plano nascente Parnaíba.** IABS. doi:ISBN 978-85-64478-52-7
- ENGINEERS, U. A. (2023). **Hydrologic Engineering Center - HEC-HAS. River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 6.4.** Acesso em 16 de Outubro de 2023, disponível em https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS_Hydraulic_Reference_Manual_v6.5.pdf
- FERNANDEZ, D. S., & Lutz, M. A. (26 de Fevereiro de 2010). **Urban flood hazard zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and multi criteria decision analysis.** (Elsevier, Ed.) *Engineering Geology*, 111, pp. 90-98. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006
- GUO, S., & Chang , F.-J. (2020). **Advances in Hydrologic Forecasts and Water Resources Management.** 12. doi:https://doi.org/10.3390/w12061819
- GUPTA, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (Abril de 1999). **Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration.** doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135)
- GUPTA, S., Muthukrishnan, A., & Srinivasan, K. (2020). **Hydrologic Modeling of an**

Urbanizing Watershed using HEC-HMS.

HERNANDEZ, L., & Szigethy, L. (05 de Maio de 2021). **IPEA - Controle de Enchentes**. Fonte: Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/231-controle-de-enchentes>

JHA, A. K., Bloch, R., & Lemond, J. (2012). **Cities and Flooding Urban Flood Risk Management for the 21st Century**. Washington: The World Bank. doi:10.1596/978-0-8213-8866-2

LI, D., Shi, P., He, X., & Zeng, F. (2018). **The analysis of urban flood risk based on GIS and RUSLE model: A case study of Guangzhou**. *Sustainable Environment Research*.

NASCIMENTO, F., Saliba, A., Tomé, F., Silva, F., Diniz, M., Sousa, G., & Alves, C. (2011). **O Método do Soil Conservation Service Revisitado: verificação de validade de premissas e aplicabilidade em projetos de mineração**. *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Acesso em 11 de Dezembro de 2023, disponível em <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=11556>

NRCS, N. (2004). **National Engineering Handbook**.

RODRIGUES Neto, E. X. (2019). **Inundações em Teresina-Piauí: uma questão socio-histórica**. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, pp. v.11, e20180177. doi: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180177>

RUDORFF, C. (11 de Dezembro de 2015). **Modelagem hidráulica para mapeamento de risco e desenvolvimento de sistemas de alerta de inundação**. Acesso em 26 de Janeiro de 2024, disponível em Centro Nacional de Monitoramento e alertas de Desastres Naturais - CEMADEN: <http://www2.cemaden.gov.br/modelagem-hidraulica-para-mapeamento-de-risco-e-desenvolvimento-de-sistemas-de-alerta-de-inundacao/>

SÁ, G., Barbosa, I., Santos, L., Freire, A., & Sousa, M. (2022). **Modelagem Hidrológica com uso de Micro Reservatórios na Sub Bacia PE11 em TERESINA - PI**. doi:<http://dx.doi.org/10.55449/congea.13.22.VIII-020>

SANTOS, K. A. (2015). **Utilização de Modelo Hidrodinâmico para Mapeamento de Áreas Inundáveis**. Acesso em 16 de Novembro de 2023, disponível em https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=3439314

SCS. (1986). **Urban Hydrology For Small Watersheds**. *U.S. Dept. Agr. (Technical Release, 55)*.

SEMPPLAN. (2018). **Avaliação Das Condições De Segurança E Estabilidade Dos Diques Dos Rios Parnaíba E Poti**. Teresina/PI. Fonte: <https://semplan.teresina.pi.gov.br/wp-content/uploads/sites/39/2019/09/Painel-de-Seguranca-2018.pdf>

SEMPPLAN. (04 de Agosto de 2024). Fonte: <https://semplan.pmt.pi.gov.br/mapas-interativos/>

SETZER, J., & Porto, R. L. (1975). **Tentativa de Avaliação de escoamento superficial de acordo com o solo e o seu recobrimento vegetal nas condições do estado de São Paulo.** *Adaptação do apêndice A da obra "Design of Small Dams" do Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior, Washington, DC, 1975).*

SILVEIRA, A. (3 de Março de 2005). **Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*, pp. 5-23. doi:10.21168/rbrh. v10n1.p5-29

SOUSA, M., Pedrosa, R., Iwata, B., & Chaves, S. (2021). **Uso De Telhados Verdes Para Controle De Águas Pluviais Urbanas Em Teresina – Piauí.** doi:10.51359/2238-6211.2021.246116

SOUZA, C., Fernandes, R., & Castro, M. (Julho de 2018). **Definição Da Planície De Inundação Das Cidades De Teresina - Pi E Timon - Ma.** *I Encontro Nacional de Desastres.*

SPERLING, M., & Naghettini, M. (2007). **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água em Rios.**

TERESINA. (2010). **Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. Plano** Diretor de Drenagem Urbana de Teresina. Relatório Final.

TERESINA, P. M. (6 de Abril de 2019). <https://pmt.pi.gov.br/tag/alagamento/>. Fonte: Prefeitura Municipal de Teresina: <https://pmt.pi.gov.br/tag/alagamento/>

THAKUR, J., Singh, S., & Ekanthalu, V. (2016). **Integrating remote sensing, geographic information systems and global positioning system techniques with hydrological modeling.** *Appl Water Sci.* doi:DOI 10.1007/s13201-016-0384-5

TUCCI, C. E. (1997). **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção.** 2.

TUCCI, C. E., & Bertoni, J. C. (2003). **Inundações e Drenagem Urbana. Inundações Urbanas na América do Sul,.** Porto Alegre: ABRH.

TUCCI, C., & Campana, N. (1993). **Simulação distribuída com IPH II, nova versão.** *X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Conesul, ABRH, Gramado, RS., pp. V. 3, p490-494.*

TUCCI, E., & Benedito, C. (2006). **Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos.** **11(3)**, pp. 15-29. doi:10.21168/rbrh.v11n3.p15-29

WU, G., Shu, L., Yao, H., & Wang, L. (2020). **Integrated water resources management under future socio-economic and climatic changes: A case study in Haihe River Basin, China.**

YU, X., & Zhang, J. (15 de Junho de 2023). **The Application and Applicability of HEC-HMS Model in Flood Simulation under the Condition of River Basin Urbanization.** 15. doi:doi.org/10.3390/w15122249

ZHU, B., Xie, X., Lu, C., Meng, S., Yao, Y., & Wang, Y. (13 de Fevereiro de 2019). **Toward high-spatial resolution hydrological modeling for China: Calibrating the VIC model.** *Hydrology and Earth System Sciences*. doi:doi.org/10.5194/hess-2019-72

ZHU, S., Li, D., Feng, H., & Zhang, N. (2023). **The influencing factors and mechanisms for urban flood resilience in china: Fron the perspective of socialéconomic-natural complex ecosystem.** *Ecologic Indicators*.