



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

MARIA FRANCISCA MASCIEL RODRIGUES

**ANÁLISE DE MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO DE
DETENÇÃO EM ÁREA SUJEITA A ALAGAMENTOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
NO HEC-HMS: área de estudo na sub-bacia PD14, Teresina-PI**

TERESINA/PI

2025

MARIA FRANCISCA MASCIEL RODRIGUES

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM RESERVATÓRIO
DE DETENÇÃO EM ÁREA SUJEITA A ALAGAMENTOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
NO HEC-HMS: área de estudo na 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

2025

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

Rodrigues , Maria Francisca Masciel

R696a Análise de métodos para dimensionamento de reservatório de detenção em área sujeita a alagamentos através de simulação no HEC-HMS : área de estudo na sub-bacia PD14, Teresina-PI / Maria Francisca Masciel Rodrigues . - 2025.

68 f.: il. color.

Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Zona Sul, 2025.

Orientador : Prof Me. Israel de Oliveira Costa.

1. sub-bacia. 2. drenagem urbana. 3. método. I. Título.

CDD - 624

Elaborado por Rudney do Carmo Paz CRB 3/1117

MARIA FRANCISCA MASCIEL RODRIGUES

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM RESERVATÓRIO
DE DETENÇÃO EM ÁREA SUJEITA A ALAGAMENTOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
NO HEC-HMS: área de estudo na 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. Kelson De Sousa Leite
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa Instituição
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

AGRADECIMENTOS

A priori, é meu dever e orgulho dedicar toda a honra e mérito a eles, Expedito Rodrigues da Costa e Risalva Lima Masciel, meus pais e precursores das minhas pequenas e grandes conquistas e que, em terra, formarão suas duas filhas.

Em destaque, agradeço a minha mãe, Risalva, pelo trabalho, esforço e investimento à minha educação. A ela, que me levou ao colégio todos os dias de minha vida sob sol e chuva, sem exceção, e acompanhou cada passo dessa jornada, dedico esse e cada um dos trabalhos escritos pelas minhas mãos durante toda a vida. Obrigada, mãe, por tornar tudo isso possível.

À minha irmã, Karla Rayssa, agradeço por ter me compartilhado sua existência e peso. Com entusiasmo, digo que, em breve, me torno fruto da mesma casa que a formou.

Ao meu professor e orientador, Me. Israel de Oliveira Costa, o qual se tornou minha principal referência dentro desse curso, obrigada por compartilhar comigo o seu tempo, os seus conhecimentos, a sua paciência e, principalmente, por me incentivar a explorar a drenagem urbana.

Ao meu amor e companheiro, presente nas alegrias e nas dores, Igor Samuel, dedico esse parágrafo para agradecê-lo pelo seu carinho, cuidado, apoio, paciência durante todo esse percurso. Obrigada por me inspirar a ser minha melhor versão a cada dia, com você, posso conquistar o impossível e será uma honra compartilhar contigo todas as vitórias até o fim de nossas vidas.

Agradeço também a todos os meus colegas e demais professores, por tornarem o caminho mais leve. Em especial, agradeço ao Geraldo Vilanova, uma das melhores pessoas que a engenharia me apresentou. Obrigada por dividir comigo todos os dias desse curso, os bons momentos, as tristezas e a carga das dificuldades encontradas. O levarei para além dos portões do campus.

“Do rio que tudo arrasta se diz que é violento. Mas
ninguém diz: violenta as margens que o comprime”

Bertolt Brecht

RESUMO

A capital do estado do Piauí, Teresina, pode ser considerada uma “Mesopotâmia” em solo brasileiro, dada a sua localização geográfica, situada entre os dois principais corpos hídricos que irrigam o território piauiense, os rios Parnaíba e Poti. Esse panorama, somado a uma grande taxa de impermeabilização do sítio urbano, confere ao município um peculiar cenário hidrológico, marcado por desafios significativos, sobretudo, relacionados a drenagem urbana. Desse modo, o presente estudo visa avaliar a implantação de um reservatório de retenção, estrutura projetada com o intuito de armazenar temporariamente a água excedente proveniente dos eventos de precipitação intensa. Para tal propósito, foram analisados 4 métodos distintos de dimensionamento preliminar de reservatórios com o fito de designar a metodologia que melhor se enquadra às características inerentes da sub-bacia escolhida, PD14, localizada na zona leste da cidade. A escolha da sub-bacia em questão se deu por conta da sua vulnerabilidade a inundações, graças aos seus aspectos geomorfológicos. Os métodos abordados, por sua vez, foram o Método da Antiga Lei Complementar nº 4723 de 3 de junho de 2015 de Teresina-PI, o Método de Tsuchiya, o Método de Urbonas e Glidden e, por fim, o Método Racional. Assim, foram obtidos os volumes de reservação a partir da aplicação de cada método em uma área específica dentro da sub-bacia PD14. Ao final, a aplicabilidade e funcionalidade dos métodos foram colocadas em comparação e as suas capacidades de relacionar diferentes cenários e variáveis hidrológicas foram fatores decisivos para a escolha do método ideal. Por conseguinte, o método de Urbonas e Glidden, por considerar maior número de variáveis, foi eleito como o mais adequado, apesar de suas limitações.

Palavras-chave: sub-bacia, drenagem urbana, método.

ABSTRACT

The capital of the state of Piauí, Teresina, can be considered a "Mesopotamia" on Brazilian soil, given its geographical location between the two main water bodies that irrigate the Piauí territory, the Parnaíba and Poti rivers. This scenario, combined with a high rate of urban site impermeabilization, gives the municipality a peculiar hydrological context, marked by significant challenges, especially concerning urban drainage. Thus, the present study aims to evaluate the implementation of a detention reservoir, a structure designed to temporarily store excess water from intense precipitation events. For this purpose, four distinct preliminary reservoir sizing methods were analyzed to determine the methodology that best suits the inherent characteristics of the chosen sub-basin, PD14, located in the eastern zone of the city. The choice of this particular sub-basin was due to its vulnerability to flooding, given its geomorphological aspects. The methods addressed were: the Method of the Former Complementary Law No. 4723 of June 3, 2015, of Teresina-PI, the Tsuchiya Method, the Urbonas and Glidden Method, and finally, the Rational Method. Subsequently, reservoir volumes were obtained by applying each method to a specific area within the PD14 sub-basin. In the end, the applicability and functionality of the methods were compared, and their ability to relate different scenarios and hydrological variables were decisive factors for selecting the ideal method. Consequently, the Urbonas and Glidden Method, by considering a greater number of variables, was chosen as the most suitable despite its limitations.

Keywords: sub-basin, urban drainage, method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Inundação (à esquerda) e enchente (à direita) em Teresina-PI.....	19
Figura 2 – Ocorrência de alagamento em Teresina-PI.....	20
Figura 3 – Localização da cidade de Teresina-PI com ênfase nos canais dos rios Poti e Parnaíba.....	20
Figura 4 – Fluxograma das medidas legislativas de Teresina-PI.....	22
Figura 5 – Relação entre as vazões de pré e pós urbanização.....	25
Figura 6 – Reservatórios de detenção fechado e aberto (respectivamente) em São Paulo – SP.....	26
Figura 7 – Esquema de funcionamento de reservatório off-line.....	26
Figura 8 – Esquema de funcionamento de reservatório in-line.....	27
Figura 9 – Reservatórios de detenção “In-Line” e “Off-Line” respectivamente em São Paulo-SP.....	27
Figura 10 – Reservatórios de detenção utilizados para fins de lazer em São Paulo SP.....	29
Figura 11 – Sub-bacia PD14 em Teresina-PI.....	37
Figura 12 – Sub-bacias prioritárias em Teresina-PI.....	38
Figura 13 – Delimitação da área de estudo dentro da sub-bacia PD14 – Teresina-PI.....	39
Figura 14 – Demarcação das áreas permeáveis (em verde) e impermeáveis (em vermelho) no software QGIS Versão 3.28.8.....	40
Figura 15 – Demarcação do comprimento do talvegue da área de estudo pelo software Google Earth.....	40
Figura 16 – Interface do HEC-HMS.....	51
Figura 17 – Componentes da modelagem no HEC-HMS.....	52
Figura 18 – Janela de configuração da bacia de detenção no HEC-HMS.....	52
Figura 19 – Janela de configuração do sistema extravasor no HEC-HMS.....	52
Figura 20 – Gráfico cota x volume no HEC-HMS para o método antigo.....	54
Figura 21 – Hidrograma do método da antiga lei complementar no HEC-HMS.....	55
Figura 22 – Tabela resumo do reservatório pelo método antigo.....	55
Figura 23 – Gráfico cota x volume no HEC-HMS para de Tsuchiya.....	56
Figura 24 – Hidrograma do método de Tsuchiya.....	57

Figura 25 – Tabela resumo do reservatório pelo método de Tsuchiya.....	57
Figura 26 – Gráfico cota x volume no HEC-HMS para o método racional.....	58
Figura 27 – Hidrograma do método racional.....	59
Figura 28 – Tabela resumo do reservatório no método racional.....	59
Figura 29 – Gráfico cota x volume no HEC-HMS para o método de Urbonas e Glidden.....	60
Figura 30 – Hidrograma do método de Urbonas e Glidden.....	61
Figura 31 – Tabela resumo do reservatório no método de Urbonas e Glidden.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais variáveis hidrológicas.....	30
Tabela 2 - Dados fisiográficos da área de estudo pertinentes ao dimensionamento do reservatório de detenção.....	39
Tabela 3 - Valores de Coeficiente de Deflúvio.....	42
Tabela 4 - Dados preliminares para o método da antiga lei.....	44
Tabela 5 - Dados preliminares para o método de Tsuchiya.....	45
Tabela 6 - Dados preliminares para o método de Urbonas e Glidden.....	46
Tabela 7 - Dados preliminares para o método racional.....	48
Tabela 8 - Volumes resultantes de cada método.....	50
Tabela 9 - Relação cota x volume para o método da antiga lei complementar	54
Tabela 10 - Relação cota x volume para o método de Tsuchiya.....	56
Tabela 11 - Relação cota x volume para o método racional.....	58
Tabela 12 - Relação cota x volume para o método de Urbonas e Glidden.....	60
Tabela 13 - Vazão de descarga em cada método.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PDDrU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
PI	Piauí
TC	Tempo de Concentração
TR	Tempo de Retorno
C	Coeficiente de Deflúvio
TCE	Tribunal de Contas do Estado
ASCE	American Society of Civil Engineers
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hidrologic Modeling System
SCS	Soil Conservation Service
IDF	Intensidade-Duração-Frequência

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	15
2.0 OBJETIVO	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.0 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 A URBANIZAÇÃO DESORGANIZADA	17
3.2 DIFERENÇAS ENTRE ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES	18
3.3 QUANTO AS MEDIDAS MITIGATÓRIAS	21
3.3.1 O manuseio de medidas não estruturais na cidade de Teresina-PI	21
3.3.2 O manuseio de medidas estruturais na cidade de Teresina-PI	22
3.4 RESERVATÓRIOS DE CONTENÇÃO DE CHEIAS	24
3.4.1 Multifuncionalidades que distinguem os reservatórios de retenção de outras estruturas hidráulicas	28
3.5 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NO DIMENSIONAMENTO DOS RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO	29
3.6 DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DE RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO	30
3.6.1 Método da Lei Complementar nº 4724 de 03/06/2015	30
3.6.2 Método de Tsuchiya	31
3.6.3 Método de Urbonas e Glidden	32
3.6.4 Método Racional	34
3.7 SIMULAÇÃO NO HEC-HMS	35
4.0 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	36
4.1 LOCAL DE ESTUDO – SUB-BACIA PD14	36
4.2 ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO	38
4.3 OBTENÇÃO DE DADOS RELACIONADOS À PRECIPITAÇÃO	41
4.3.1 Intensidade da Precipitação – Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF)	41
4.3.2 Coeficiente de Deflúvio (C) – Run-Off	42
4.3.3 Tempo de Concentração (Tc)	43
4.4 DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DE RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO...	44
4.4.1 Método da Antiga Lei Complementar nº4724 de 3 de junho de 2015	44

4.4.2 Método de Tsuchiya (1978)	45
4.4.3 Método de Urbonas e Glidden (1982)	46
4.4.4 Método Racional	48
4.5 SIMULAÇÃO NO HEC-HMS	49
4.5.1 Abstração Inicial (Inicial Abstraction)	49
4.5.2 Tempo de Retardo (Lag time)	50
4.5.3 Interface da Simulação	51
4.5.3.1 Configuração do Reservatório de Detenção no REC-HMS	51
4.5.4 Modelagem do Reservatório de Detenção	53
4.5.4.1 Método da Antiga Lei Complementar nº4724 de 3 de junho de 2015	54
4.5.4.2 Método de Tsuchiya	56
4.5.4.3 Método Racional	58
4.5.4.4 Método de Urbonas e Glidden	60
6.0 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	64

1.0 INTRODUÇÃO

A implantação de um município deve ser guiada por uma sólida política de planejamento. Tal planejamento deve estar atrelado a uma sequência de estudos que buscam apresentar soluções eficientes para suprir as necessidades não somente dos residentes, mas do meio natural que os circunda. Essa abordagem, por sua vez, precisa ser compreendida como uma ferramenta técnica e científica essencial para a construção de cidades eficientes e sustentáveis, com o intuito de garantir a qualidade de vida (Vilaça, 2001).

Em contrapartida, de acordo com Maricato (2000) a ausência desse enfoque pode resultar em problemas socioespaciais e ambientais e, conseqüentemente, provocar desequilíbrio econômico, agravar a desigualdade entre os habitantes e intensificar os problemas de infraestrutura e meio ambiente.

Dentre tais querelas que comprometem o ecossistema, cabem citar a perda de áreas verdes, degradação da qualidade dos recursos hídricos, geração excessiva de resíduos sólidos, ilhas de calor, deslizamentos e inundações. Sob esse prisma, as inundações podem ser classificadas como um dos desastres naturais mais comuns e de maior impacto socioeconômico, especialmente em áreas urbanas desordenadas e mal planejadas (CANHOLI, 2014).

Conforme essa visão, na sub-bacia de estudo, PD14, é pertinente apontar como os principais causadores de enchentes a alta taxa de impermeabilização do solo e a ausência de sistemas de drenagem adequados capazes de suprir a demanda solicitada nas estações chuvosas. Desse modo, o volume de água anteriormente infiltrado no solo, escoar rapidamente aos dispositivos de drenagem, o que resulta na sua sobrecarga. Tal fato, ocasiona a redução do tempo de concentração (TC) da sub-bacia, e leva a região bruscamente ao seu pico de vazão, intensificando os alagamentos (TUCCI, 2017).

Assim, faz-se pertinente a busca por soluções funcionais que reforcem o sistema de drenagem urbana da sub-bacia em questão e, por conseguinte, que promovam a segurança dos residentes e melhorem a qualidade de vida deles.

Destarte, dentre as medidas disponíveis para tal problemática, é possível citar as não-estruturais e as estruturais. De acordo com Canholi (2014), a educação ambiental e o uso da legislação e políticas públicas são exemplos da abordagem não estrutural, enquanto a implementação de galerias a águas pluviais, canais, sarjetas e

reservatórios de detenção, configuram as medidas estruturais. Outrossim, a combinação entre ambas as medidas é essencial para um sistema de drenagem eficiente (TUCCI, 2017).

Por conseguinte, neste presente trabalho foi abordado o uso dos reservatórios de detenção, medida estrutural capaz de armazenar temporariamente volumes excedentes de água pluvial, de regular a vazão de saída e diminuir os impactos no sistema de drenagem a jusante da sub-bacia (MIGUEZ et al, 2012). Ademais, tais estruturas possuem grande versatilidade, e desempenham papéis que vão além do controle de enchentes. Conforme Schueler, Hirschman e Novotney (2009), essas estruturas podem ser integradas a áreas públicas, como parques e praças, promovendo o uso recreativo e estético.

Wong (2006), por sua vez, destaca que os reservatórios – ou bacias – podem ser projetados para incluir sistemas de tratamento preliminar, como decantação e vegetação aquática, que auxiliam na remoção de sedimentos e poluentes antes que a água seja liberada para os corpos receptores.

Dessa forma, Teresina passou a implementar as bacias de detenção como parte de suas estratégias de gerenciamento de águas pluviais para mitigar os impactos das enchentes urbanas. Por conseguinte, a Lei Complementar nº 6105, de 7 de junho de 2024 (TERESINA, 2024), estabelece diretrizes para o controle de impactos causados pela ausência de um sistema de drenagem e inclui, por exemplo, a obrigatoriedade de sistemas de captação e detenção de águas pluviais em lotes com área impermeabilizada superior a 750m². Isso é capaz de refletir o compromisso do município em adotar soluções estruturais eficazes para o controle de enchentes.

Assim, diante da aplicabilidade dos reservatórios de detenção e dos seus impactos positivos, foram analisadas diversas metodologias para o dimensionamento preliminar dessas estruturas, dentre elas o método adotado pela antiga Lei Complementar nº 4724 de Teresina-PI, o Método de Tsuchiya (1974), o Método de Urbonas e Glidden (1982) e, por fim, o Método Racional, com o intuito de avaliar o que melhor se adequa as características morfológicas da sub-bacia PD14 e comparar o potencial de reservação de cada um deles.

2.0 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar 4 métodos distintos de dimensionamento para uma bacia de retenção na sub-bacia PD14, situada na cidade de Teresina-PI.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o intuito de atingir as metas propostas pelo objetivo geral, têm-se os seguintes passos a serem efetuados:

- Dimensionar preliminarmente um reservatório de retenção na sub-bacia PD14 utilizando quatro metodologias distintas.
- Determinar o volume de retenção correspondente a cada método analisado.
- Comparar os resultados obtidos entre as diferentes metodologias e avaliar sua aplicabilidade para o controle de escoamento superficial.
- Comparar os resultados dos métodos analíticos com as simulações no HEC-HMS, avaliando a adequação das diferentes abordagens.
- Identificar a abordagem mais recomendável para a sub-bacia PD14 considerando critérios de eficiência e viabilidade.

3.0 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A URBANIZAÇÃO DESORGANIZADA

A urbanização trata-se um fenômeno que transcende o simples crescimento físico das cidades. Desse modo, ela é capaz de representar as profundas transformações socioespaciais, nas quais áreas pouco desenvolvidas se convertem em espaços urbanos, devido à intensas migrações populacionais e reestruturações econômicas. Logo, conclui-se que tal processo reflete e, simultaneamente, molda as relações sociais, expandindo-se e generalizando-se em escala global (LEFEBVRE,

1972).

Sob tal perspectiva, na segunda metade do século XX, o Brasil vivenciou seu primeiro marco de expansão urbana de forma acelerada e significativa. Conforme destaca Maricato (2000), essa transformação resultou em um adensamento populacional desordenado, evidenciado pela metropolização das cidades e pelo surgimento de periferias carentes de infraestrutura básica.

Em consequência disso, uma série de impactos negativos é provocada, na qual a qualidade da vida urbana e a sustentabilidade ambiental são comprometidas. Nesse contexto, a ocupação irregular do solo, frequentemente em áreas de risco, é um dos mais relevantes efeitos da urbanização desorganizada, fator esse responsável por elevar a vulnerabilidade socioambiental das populações (CABRAL e CÂNDIDO, 2019).

Dado o exposto, a degradação de ecossistemas naturais, a poluição dos recursos hídricos e a redução da biodiversidade são produtos danosos desse processo. Além disso, cabe ressaltar, como um dos principais reflexos da ocupação irregular, a impermeabilização excessiva do solo, visto a sua capacidade de impedir a infiltração da água da chuva, intensificar o escoamento superficial e potencializar o risco de alagamentos (MOURA; CUNICO; LUCENA, 2023).

3.2 DIFERENÇAS ENTRE ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES

Os alagamentos são fenômenos que ocorrem devido ao escoamento superficial provocado por precipitações intensas em áreas parcial ou totalmente impermeabilizadas, nas quais a água é impossibilitada de infiltrar no solo, acumulando-se na superfície (Valente, 2009).

Com base nesse conceito, é necessário destacar a distinção entre os alagamentos e inundações que, embora frequentemente utilizados como sinônimos, possuem aspectos que elucidam suas particularidades. De acordo com Valente (2009), o alagamento refere-se ao acúmulo temporário de água em áreas urbanas, resultante de precipitações intensas que excedem a capacidade dos sistemas de drenagem, especialmente em regiões com alta impermeabilização do solo.

Por outro lado, a inundação caracteriza-se pelo transbordamento de corpos hídricos, como rios e córregos, que, ao ultrapassarem suas margens, submergem áreas adjacentes, fenômeno que pode ser agravado por fatores naturais e antrópicos

(SANTOS, 2024).

Figura 1 – Inundação (à esquerda) e enchente à direita) em Teresina-PI



Fonte: Portal Meio Norte e Portal Luneta

Cabe citar que as alterações climáticas são um dos fatores para a formação de alagamentos. Consoante a Araújo e Oliveira (2022), as mudanças climáticas elevam o risco de enchentes e alagamentos, o que compromete a infraestrutura urbana e a segurança dos residentes. Além disso, no caso cidades costeiras, a elevação do nível do mar, consequência do aquecimento global, as tornam mais vulneráveis a inundações.

Diante do exposto, Teresina, capital do Piauí, nos últimos 25 anos, tem experimentado alterações climáticas significativas, manifestadas sobretudo pelo aumento das temperaturas médias e pela irregularidade das precipitações.

Portanto, com base no Plano de Ação Climática da cidade, divulgado pela Secretaria Municipal de Planejamento (Semplan), a temperatura média anual elevou-se de 26,5 °C em 1991 para 27,5 °C em 2021, o que indica um acréscimo de 1°C em apenas três décadas. Esse aquecimento, que ocorreu a uma taxa duas vezes superior à média global, está associado tanto às mudanças climáticas mundo afora quanto à urbanização acelerada, caracterizada pela verticalização, expansão territorial e ocupação do solo.

Tal contexto resulta na irregularidade das chuvas, e provoca eventos extremos de precipitação, os quais podem vir a ocorrer em curtos espaços de tempo, e levar à sobrecarga dos sistemas de drenagem.

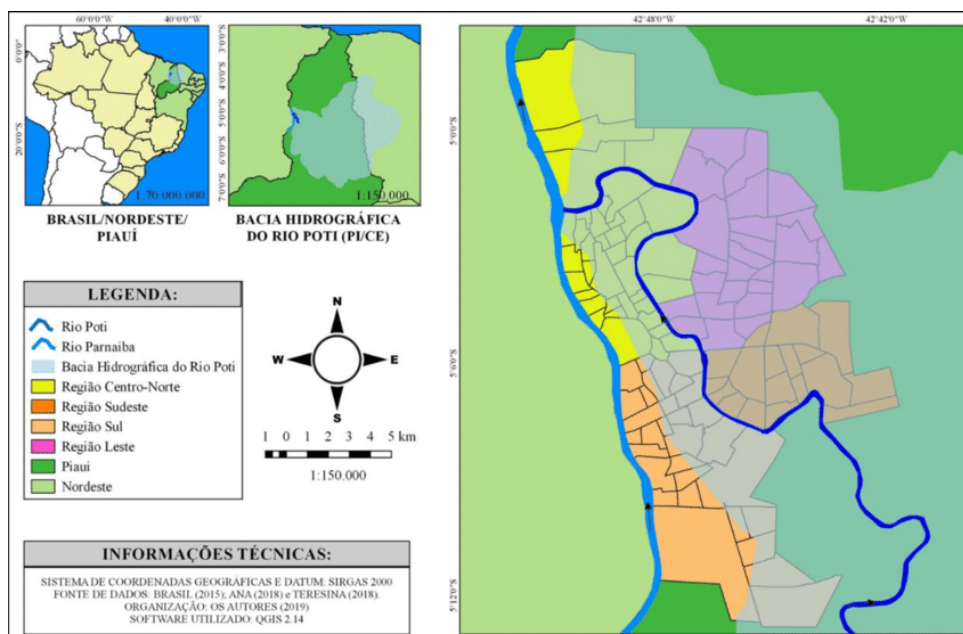
Figura 2 – Ocorrência de alagamento em Teresina-PI



Fonte: Portal Conecta Piauí

Ademais, um outro fator relacionado aos alagamentos em Teresina é a sua posição geográfica. Por estar situada entre os rios Parnaíba e Poti, os principais corpos hídricos que irrigam a capital e que exercem uma influência significativa na ocorrência desses fenômenos. A cidade encontra-se em um interflúvio, o que a torna suscetível a alagamentos e inundações (RODRIGUES NETO e LIMA, 2019).

Figura 3 – Localização da cidade de Teresina-PI com ênfase nos canais dos rios Poti e Parnaíba



Fonte: Revista Brasileira de Geografia Física (2021)

Sob tal aspecto, pode-se constatar que os alagamentos urbanos resultam da interação entre variáveis geográficas, hidrológicas e fatores antrópicos que comprometem a capacidade de escoamento das águas pluviais. Dessa forma, segundo Mendes (2023), a insuficiência de sistemas de drenagem e a ausência de políticas públicas eficazes agravam os impactos socioambientais desses eventos e resultam em prejuízos materiais e riscos à saúde pública.

Diante desse cenário, torna-se imperativo que Teresina adote medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, incluindo o incremento de áreas verdes, melhoria da infraestrutura urbana e implementação de políticas públicas voltadas para a sustentabilidade ambiental.

3.3 QUANTO AS MEDIDAS MITIGATÓRIAS

As medidas mitigatórias de alagamentos são classificadas em estruturais e não estruturais, e desempenham um papel essencial na preservação do equilíbrio hidrológico das cidades, e buscam minimizar os impactos negativos desses eventos na sociedade.

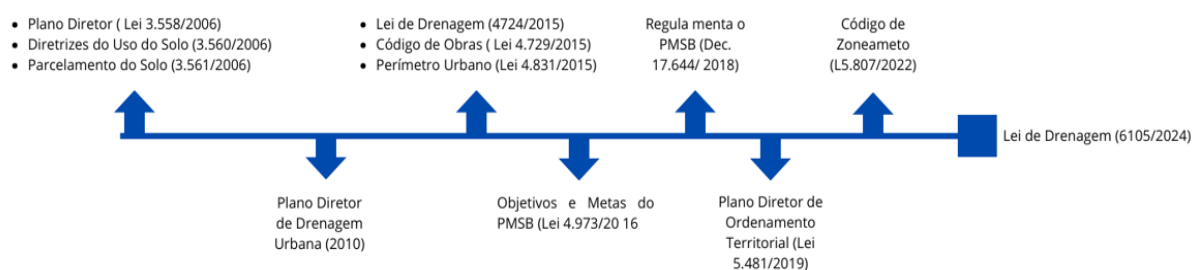
Conforme Tucci (2008), as medidas estruturais englobam intervenções físicas e de engenharia, enquanto as medidas não estruturais incluem o planejamento territorial, o reflorestamento de áreas de várzea e implementação de políticas públicas

que restringem a ocupação de zonas suscetíveis a inundações.

3.3.1 O manuseio de medidas não estruturais na cidade de Teresina-PI

Dada a vulnerabilidade de Teresina quanto a ocorrência de inundações e alagamentos, fez-se latente a necessidade da elaboração de planos e legislações capazes de amparar a capital diante de cenários catastróficos.

Figura 4 – Fluxograma das medidas legislativas de Teresina-PI



Fonte: autor (2025)

Portanto, em 2010, foi concebido o Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU) de Teresina, que emergiu como um instrumento vital para a gestão de recursos hídricos da capital piauiense. Esse plano, por sua vez, estabelece diretrizes institucionais que garantem a sustentabilidade e a permanência dos objetivos relacionados ao escoamento das águas pluviais.

Assim, de acordo com o Tribunal de Contas do Estado do Piauí (2024), o PDDrU aborda o crescimento desordenado da cidade e o planejamento inadequado do sistema de drenagem urbana, fatores que agravam os problemas de alagamento e inundações. Ademais, ele propõe a caracterização das condições hidráulicas das infraestruturas existentes e a elaboração de anteprojetos para obras necessárias à resolução dos problemas identificados.

Além do plano diretor, como medida mitigatória não estrutural, cabe citar a Lei Complementar nº4.724, promulgada em 3 de junho de 2015. Essa lei estabelece

diretrizes para a regulamentação dos efeitos da drenagem urbana em novos empreendimentos e inundações ribeirinhas em Teresina. Entretanto, em 7 de junho de 2024, a Lei Complementar nº 6.105 alterou dispositivos da legislação anterior, com o intuito de aprimorar as estratégias de controle de drenagem urbana.

3.3.2 O manuseio de medidas estruturais na cidade de Teresina-PI

As medidas estruturais de combate a alagamentos englobam intervenções de engenharia destinadas a controlar o escoamento das águas pluviais, com o intuito de mitigar os impactos das inundações urbanas. Essas medidas, por sua vez, subdividem-se em convencionais e não convencionais.

Destarte, medidas não convencionais são soluções inovadoras que visam atenuar os efeitos das enchentes ao promover a integração entre a infraestrutura urbana e os processos naturais de escoamento e retenção da água. Sob esse prisma, Canholi (2014) destaca que essas intervenções se diferenciam das abordagens tradicionais ao priorizarem mecanismos que reduzem a impermeabilização do solo e promovem a infiltração das águas pluviais, o que resulta na minimização da sobrecarga nos sistemas de drenagem convencionais.

Outrossim, cabe citar a implantação de pavimentos permeáveis, jardins de chuva, telhados verdes e reservatórios de infiltração como medidas essenciais que caracterizam a abordagem não tradicional (TUCCI, 2008).

Por outro lado, as medidas estruturais convencionais de drenagem urbana, fundamentadas nos princípios da hidráulica e da hidrologia, englobam um conjunto de intervenções de engenharia concebidas para mitigar os efeitos adversos de inundações e enchentes em áreas urbanas (TUCCI, 2017).

Tais soluções, amplamente adotadas, visam o controle e a condução eficiente do fluxo pluvial, desviando-o de áreas vulneráveis e direcionando-o para corpos hídricos receptores ou sistemas de tratamento (BRAGA et al., 2018).

Dentre as medidas estruturais mais comuns, destaca-se a implantação de redes de drenagem subterrâneas, compostas por tubulações de diferentes diâmetros, que coletam a água pluvial por meio de bocas de lobo e poços de visita, conduzindo-a, subsequentemente, para galerias pluviais de maior porte (CANHOLI, 2014). Estas galerias, por sua vez, são dimensionadas para suportar vazões elevadas, e

encaminhar o fluxo pluvial para os pontos de descarga, como rios, córregos ou bacias de retenção.

Ademais, a construção de canais de drenagem, tanto abertos quanto revestidos, representa uma alternativa para o escoamento superficial da água pluvial, especialmente em áreas onde a implantação de redes subterrâneas se mostra inviável ou economicamente desvantajosa (SANGAL et al., 2017). Esses canais, dimensionados de acordo com a vazão máxima esperada, permitem o transporte eficiente do fluxo pluvial.

Outrossim, a implantação de bacias de retenção e outros dispositivos de controle de cheias, como barragens e diques, desempenha um papel crucial na retenção temporária do volume de água pluvial, em períodos de chuvas intensas (TUCCI, 2017). Essas estruturas, estrategicamente localizadas em pontos de acumulação natural ou projetadas artificialmente, armazenam o excesso de água, e o libera gradualmente para a rede de drenagem ou para os corpos hídricos, o que evita picos de vazão e minimiza o risco de inundações a jusante.

Sob tal perspectiva, em Teresina-PI, a aplicação de medidas estruturais de combate a enchentes tem se mostrado um desafio complexo, com avanços e desafios persistentes. Desse modo, para mitigar esses impactos, a administração municipal tem investido em obras de infraestrutura, como a construção e manutenção de galerias pluviais, canais de drenagem e bacias de retenção (TCE-PI, 2024).

Essas intervenções, embora importantes, nem sempre se mostram suficientes diante da magnitude dos eventos climáticos extremos e da complexidade do sistema de drenagem urbana. Portanto, Tucci (2017) e Braga et al. (2018) salientam a importância de uma abordagem integrada e multidisciplinar na gestão da drenagem urbana, que considere as particularidades do contexto local, as projeções de mudanças climáticas e a participação da comunidade.

3.4 RESERVATÓRIOS DE CONTENÇÃO DE CHEIAS

Conforme Baptista, Nascimento e Barraud (2011), os reservatórios e contenção de cheias podem ser classificados conforme dois conceitos principais:

- Retenção: o reservatório de retenção é uma estrutura planejada para armazenar, de forma controlada, o excesso de água—seja oriunda de chuvas intensas ou de efluentes—por longos períodos.
- Detenção: o reservatório de detenção é uma estrutura capaz de deter a água proveniente de eventos chuvoso por um curto período, geralmente inferior a 24 horas, e visa o controle momentâneo de águas pluviais a jusante.

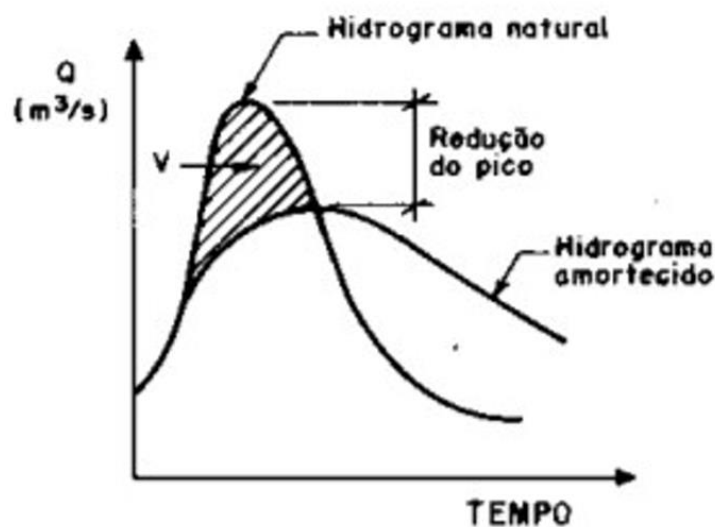
Desse modo, as soluções alternativas para os problemas relacionados a drenagem pluvial diferem-se das tradicionais por envolverem os conceitos de infiltração e armazenamento (Nakazone, 2005). Assim, enquanto o armazenamento promove a redução do pico do hidrograma, por conta da retenção temporária do volume precipitado, a infiltração é capaz de promover a redução do escoamento superficial. Logo, os reservatórios de retenção são estruturas de armazenamento, enquanto os de detenção, podem ser tanto de armazenamento quanto de infiltração

Os reservatórios de detenção, por sua vez, são elementos cruciais na gestão de drenagem urbana, representam estruturas de engenharia hidráulica projetadas com o propósito de mitigar os impactos de cheias e inundações em áreas urbanizadas (TUCCI, 2017).

Sob a ótica da hidrologia, essas estruturas atuam como dispositivos de armazenamento temporário, interceptam e retêm o excesso de água pluvial durante eventos de precipitação intensa (BRAGA et al., 2018). Ao fazê-lo, os reservatórios de detenção promovem a redução do pico de vazão a jusante, atenuam o risco de transbordamentos e alagamentos em áreas vulneráveis.

Diante do exposto, os reservatórios de detenção possuem como princípio básico atingir a máxima aproximação entre a vazão de pré-urbanização e pós-urbanização, denominado Teoria do Impacto Zero, na qual a curva que simula a situação após a implantação dessas estruturas, deve aproximar-se com a curva da situação inicial.

Figura 5 – Relação entre as vazões de pré e pós urbanização



Fonte: Tucci (2008)

Adenda-se ainda que esses reservatórios podem ser abertos ou fechados. Os abertos, por sua vez, ao passo que possuem custo de implantação baixo, demandam mais manutenções a fim de evitar a proliferação e mau cheiro e doenças. Em contrapartida, os fechados possuem melhor performance, sobretudo para locais com elevada densidade demográfica, haja vista a possibilidade de adequar-se às pequenas áreas explorando sua profundidade (Soluções para Cidades, 2013).

Figura 6 – Reservatórios de retenção fechado e aberto (respectivamente) em São Paulo - SP

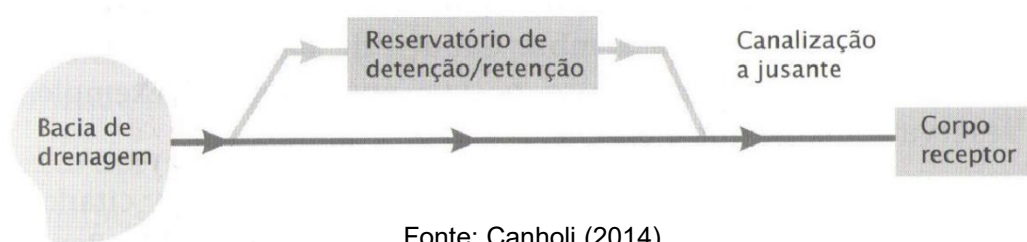


Fonte: Iso9001 (2024)

Ainda quanto sua classificação, os reservatórios de retenção podem ser relacionados conforme o seu curso d'água:

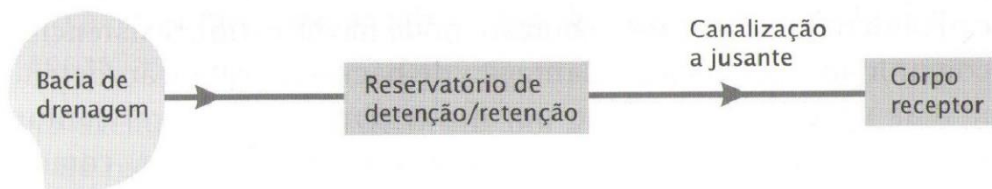
- Reservatórios em Paralelo (Off line): são construídos nas margens ou em paralelo com o curso d'água conforme mostra o esquema a seguir:

Figura 7 – Esquema de funcionamento de reservatório off-line



- Reservatórios em Série (In line): são implementados sobre ou ao longo do curso d'água como na figura abaixo:

Figura 8 – Esquema de funcionamento de reservatório in-line



Neves et al (2005), pontua que os reservatórios em paralelo não entram em funcionamento em todos os eventos chuvosos e sim em situações específicas nas quais o volume previsto em projeto é superado. Em contrapartida, os reservatórios em serie são capazes de captar todo o volume de água precipitada. Dessa forma, a diferença determinante entre eles é a existência de um by-pass cuja função é desviar a vazão do reservatório caso a capacidade do projeto não seja alcançada.

Figura 9 – Reservatórios de detenção “In-Line” e “Off-Line” respectivamente em São Paulo-SP



Fonte: Iso9001 (2024)

Segundo o relatório Soluções para Cidades de 2013, a configuração de um reservatório de retenção é, em grande parte, determinada pela disponibilidade de área para sua construção. Porquanto, em áreas urbanas densamente povoadas, onde o espaço é limitado, a configuração de reservatório em paralelo emerge como uma solução mais eficaz. Isso se deve à sua capacidade de armazenar volumes maiores de água, em virtude de sua cota de fundo mais profunda em relação ao leito do córrego (ABCP, 2013).

Contudo, essa configuração demanda, frequentemente, o uso de bombas para o esvaziamento do reservatório, o que acarreta custos elevados de implantação, operação e manutenção. Em contrapartida, em regiões com menor densidade urbana e maior disponibilidade de espaço, a configuração de reservatórios em série, com menor profundidade, é a mais comumente adotada.

Outrossim, do ponto de vista hidráulico, o dimensionamento de reservatórios de retenção exige uma análise criteriosa das características hidrológicas da bacia de contribuição, e inclui a estimativa de vazões máximas para diferentes períodos de retorno e a avaliação da capacidade de infiltração do solo (CANHOLI, 2014). Logo, a geometria e o volume do reservatório são determinados de forma a otimizar a eficiência da retenção e garantir a segurança da estrutura, aos fatores como a declividade do terreno, a disponibilidade de área e os custos de construção.

Assim sendo, a operação de reservatórios de retenção pode ser controlada por meio de dispositivos de descarga, como vertedouros e orifícios, que regulam a liberação da água armazenada de acordo com a capacidade de vazão do sistema de drenagem a jusante (SANGAL et al., 2017). A modelagem hidrológica e hidráulica, utilizando softwares específicos, permite simular o comportamento do reservatório em

diferentes cenários de chuva e otimizar o projeto e a operação da estrutura.

3.4.1 Multifuncionalidades que distinguem os reservatórios de retenção de outras estruturas hidráulicas

Quanto às suas peculiaridades, a principal distinção reside na sua capacidade de armazenar temporariamente o excesso de água pluvial durante eventos de precipitação intensa (BRAGA et al., 2018).

Todavia, os reservatórios de retenção, embora primariamente concebidos para esse propósito, transcendem sua função primordial, e oferecem uma gama de benefícios adicionais que os caracterizam como elementos multifuncionais na gestão de drenagem urbana (TUCCI, 2017).

Tais elementos podem atuar como dispositivos de tratamento natural da água pluvial, ao removerem poluentes como sedimentos, matéria orgânica e metais pesados por meio de processos de sedimentação, filtração e absorção (BRAGA et al., 2018). Em suma, a água armazenada, após passar por estes processos, pode ser liberada para os corpos hídricos com qualidade aprimorada, e contribuir para a preservação ambiental.

Do mesmo modo, a infiltração da água armazenada nos reservatórios de retenção pode auxiliar a recarga de aquíferos subterrâneos, e reabastecer as reservas de água, o que garante a provisão hídrica em períodos de estiagem (CANHOLI, 2014). Essa função, por sua vez, é particularmente relevante em regiões onde a disponibilidade de água subterrânea é essencial para o abastecimento público.

Ademais, os reservatórios de retenção, quando integrados a projetos paisagísticos adequados, podem se transformar em áreas de lazer e recreação para a população e oferecer espaços para atividades ao ar livre, como caminhadas, ciclismo e observação de aves (SANGAL et al., 2017).

Figura 10 – Reservatórios de retenção utilizados para fins de lazer em São Paulo-SP



Fonte: Iso9001 (2024)

Em síntese, a presença de reservatórios de retenção, quando harmoniosamente integrada à paisagem urbana, pode valorizar o espaço público e torná-lo mais agradável e esteticamente atraente.

3.5 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NO DIMENSIONAMENTO DOS RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO

A etapa que precede o dimensionamento dos reservatórios, bem como de quaisquer estruturas voltadas para a drenagem pluvial, é a coleta de dados. Sob tal espectro, Sperling (2007), afirmam que as respostas para inúmeras problemáticas voltada à hidrologia aplicada serão exatas quando os registros de dados forem mais longos e precisos.

Tabela 1 – Principais variáveis hidrológicas

Variável	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, m³/s
	Volume	m³, (m³/s)
	Altura equivalente (Deflúvio)	mm ou cm sobre área
Escoamento subterrâneo	Vazão	l/min, l/h, m³/dia
	Volume	m³

Fonte: Santos (2024)

3.6 DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DE RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO

3.6.1 Método da Lei Complementar nº 4724 de 03/06/2015

A Lei Complementar nº4724 de 3 de junho de 2015 (TERESINA, 2015) estabelece uma metodologia simplificada para o dimensionamento preliminar de reservatórios de retenção na cidade de Teresina, no Piauí. Por conseguinte, a partir da expressão reduzida abaixo, é possível calcular o volume de reservação em função da taxa de impermeabilização da área de contribuição.

$$v = 5,33 \times Ai \quad (1)$$

Onde: v = volume de reservação (m³)

Ai = área impermeabilizada da bacia (%)

Em particular, convém frisar que o método aplicado sofre limitações relacionadas a área de contribuição, a qual deve possuir medida inferior a 100 hectares. Se superior a esse valor, a manutenção da vazão pré-ocupação deve ser determinada através de estudos específicos à área elegida para o estudo (TERESINA, 2015).

Conquanto essa fórmula permita a rápida resolução da busca pelo volume que o reservatório há de suportar, sua precisão pode não ser satisfatória por depender apenas da área impermeabilizada, o que levou à reformulação da lei nos anos seguintes

3.6.2 Método de Tsuchiya

O Método de Tsuchiya, proposto por Masao Tsuchiya, emerge como uma ferramenta para o dimensionamento preliminar de reservatório de retenção, especialmente em contextos urbanos onde a gestão eficiente das águas pluviais se impõe como uma necessidade premente (TSUCHIYA, 1974).

Essa técnica é baseada no estudo de 230 bacias de uso permanente com áreas de 0,10 a 20 hectares (TSUCHIYA, 1978) e, com sua abordagem singular, concentra-se na análise da relação entre a área de contribuição, o tempo de concentração e o volume de armazenamento necessário para controlar os picos de vazão, elementos cruciais na prevenção de inundações e na proteção da infraestrutura urbana, conforme a equação abaixo:

$$V = 0,0028 \times \left(i_i - \frac{i_0}{2} \right) \times d_i \times C \times A \quad (2)$$

Onde: V = volume do reservatório e retenção (m³)

C = coeficiente de deflúvio (adimensional)

A = área da bacia contribuinte (há)

d_i = duração da chuva (segundos)

i_i = intensidade da chuva com duração d_i e TR = 30 anos

i_0 = intensidade da chuva correspondente a capacidade de escoamento do canal a jusante da bacia (mm/h)

Diante de tal singularidade, essa metodologia consta na vigente Lei Complementar nº 6.105, de 7 de junho de 2024 (TERESINA, 2024), como o procedimento padrão para o dimensionamento preliminar de reservatórios de retenção, visto sua complexidade e capacidade de relacionar diversas variáveis primordiais da hidrologia.

Ademais, a lei mencionada determina que Tsuchiya deve ser utilizado pra áreas de contribuição inferiores a 100 hectares.

Outrossim, o método se distingue por sua ênfase na determinação do hidrograma de projeto, que representa a vazão máxima esperada para um determinado período de retorno e leva em consideração as características da bacia hidrográfica e os padrões de precipitação. Logo, através da análise do hidrograma de projeto, é possível estimar o volume de armazenamento necessário para reduzir os picos de vazão a níveis aceitáveis, garantindo a segurança e a funcionalidade do sistema de drenagem urbana.

Desse modo, a sua aplicação, embora eficiente em muitos cenários, exige uma compreensão profunda dos princípios da hidrologia e da hidráulica (BEDIENT e HUBER, 2012), bem como o domínio de técnicas de modelagem e simulação.

Destarte, apesar de suas qualidades, o método de Tsuchiya não está isento de críticas. Assim, Loucks, Stedinger e Haith (1981) aponta para a necessidade de calibração e validação do método em cada aplicação específica, a fim de garantir sua precisão e confiabilidade.

3.6.3 Método de Urbonas e Glidden

O método de Urbonas e Glidden, proposto por Ben Urbonas e James W. Glidden, representa uma abordagem simplificada para o dimensionamento de reservatórios de detenção, especialmente útil em fases iniciais de projeto ou quando dados hidrológicos detalhados são escassos (URBONAS e GLIDDEN, 1982).

Diferentemente de métodos hidrológicos mais complexos, que requerem a análise de hidrogramas e curvas de permanência, o método de Urbonas e Glidden concentra-se na relação entre a área de contribuição, o grau de impermeabilização e o volume de armazenamento necessário para atingir uma determinada redução nos picos de vazão.

Tal metodologia parte do princípio de que o volume de detenção requerido é diretamente proporcional à diferença entre o volume de escoamento gerado pela área impermeável e o volume de escoamento permitido após a implementação do reservatório. Assim, através da utilização de curvas ou tabelas desenvolvidas especificamente para a região de Denver, Colorado, o método permite estimar o

volume de armazenamento necessário com base em cenários de chuva e graus de impermeabilização predefinidos (CANHOLI, 2014).

É importante ressaltar que para a sua aplicação em outras localidades, devem ser calculados fatores de correção para as precipitações de região de estudo, visto que o procedimento original corresponde especificamente para Denver, nos EUA (CANHOLI, 2014). Ademais, as relações obtidas para tal contexto permitem que a obtenção do volume de reservação e vazão máxima estejam restritas a tempos de retorno (TR) de 10 e 100 anos apenas.

Urbonas e Glidden, a partir da modelagem em computador de uma bacia com 25 km², obtiveram relações capazes de definir os volumes de reservação para precipitações de tempos de retorno iguais a 10 e 100 anos (CANHOLI, 2014).

Por conseguinte, as relações obtidas convertidas para o S.I. foram:

$$V_{10} = 304,8 \times A \times (0,95 \times I - 1,90) \quad (3)$$

Onde: V_{10} = volume de retenção para TR = 10 anos (m³)

A = área de contribuição (km²)

I = área impermeabilizada da bacia (%)

Para TR = 100 anos, têm-se a equação abaixo:

$$V_{100} = 304,8 \times A \times (1,78 \times I^2 - 3,56) \quad (3.1)$$

Onde: V_{100} = volume de retenção para TR = 100 anos (m³)

A = área de contribuição (km²)

I = área impermeabilizada da bacia (%)

Outrossim, o método também fornece equações para a definição das vazões máximas, sendo elas:

$$Q_{10} = 1,68 \times A \quad (3.2)$$

$$Q_{100} = 7,00 \times A \quad (3.3)$$

Onde: Q_{10} = vazão máxima para TR = 10 anos (m^3/s)

Q_{100} = vazão máxima para TR = 100 anos (m^3/s)

A = área de contribuição (km^2)

No entanto, a principal vantagem do método de Urbonas e Glidden reside na sua simplicidade e facilidade de aplicação. Assim, não há limitações quanto a área de contribuição, o que o torna uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões preliminares em projetos de drenagem urbana. Contudo, a sua natureza simplificada implica algumas limitações inerentes, como a desconsideração de fatores hidrológicos mais complexos, a exemplo do tempo de concentração e da distribuição temporal da chuva, conforme apontado por Tucci (2017).

Nesse contexto, Braga et al. (2018) e Porto (2006) preconizam que o método de Urbonas e Glidden, embora útil em fases iniciais de projeto, deve ser complementado por análises hidrológicas e hidráulicas mais detalhadas em etapas subsequentes, sobretudo em projetos de maior envergadura ou em áreas com características hidrológicas complexas.

3.6.4 Método Racional

O Método Racional, embora tradicionalmente aplicado para estimar vazões de pico em projetos de drenagem urbana, pode ser adaptado para auxiliar no dimensionamento de reservatórios de retenção, oferecendo uma abordagem simplificada, especialmente útil em áreas com dados hidrológicos limitados (TUCCI, 2017). A metodologia baseia-se na relação entre a intensidade da chuva, a área de contribuição e o coeficiente de escoamento, permitindo estimar a vazão máxima que o reservatório deve ser capaz de controlar.

Assim, para chegar ao volume de retenção, primeiramente calcula-se a vazão de escoamento por meio da equação abaixo:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3,6} \quad (4)$$

Onde: Q = vazão de escoamento (m^3)

I = intensidade pluviométrica (mm/h)

A = área de contribuição (m^2)

Para o volume de retenção, utiliza-se, por fim, a seguinte expressão:

$$V_{det} = (Q_2 - Q_1) \times t \times 60 \quad (4.1)$$

Onde: V_{det} = volume de retenção (m^3)

t = duração da chuva (minutos)

Q_1 = vazão de escoamento da área pré-urbanizada (m^3/s)

Q_2 = vazão de escoamento da área pós-urbanizada (m^3/s)

No contexto de reservatórios de retenção, o esse método pode ser empregado para estimar o volume de armazenamento necessário para reduzir a vazão de pico a um nível aceitável, considerando um determinado período de retorno (BRAGA et al., 2018). Através da análise da curva de intensidade-duração-frequência (IDF) e da determinação do tempo de concentração da bacia, é possível calcular a vazão máxima que o reservatório deverá ser capaz de conter.

A aplicação de tal metodologia para dimensionamento de reservatórios de retenção, embora apresente vantagens como a simplicidade e a facilidade de aplicação, possui limitações importantes. O método não considera a distribuição temporal da chuva, o que pode levar a estimativas conservadoras do volume de armazenamento (PORTO, 2006). Além disso, o Método Racional é mais adequado para áreas com tempo de concentração relativamente curto, com características hidrológicas homogêneas e áreas de contribuição menores que 200 hectares.

3.7 SIMULAÇÃO NO HEC-HMS

O HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) é um software desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos para a modelagem e simulação de processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Ele é amplamente utilizado para analisar o comportamento da água em diferentes cenários, sendo essencial para projetos de drenagem, planejamento de recursos

hídricos, previsão de enchentes e estudos ambientais.

O HEC-HMS permite a modelagem de diversos processos hidrológicos, como precipitação, infiltração no solo, escoamento superficial, evapotranspiração, propagação de cheias e vazões em cursos d'água. Ele conta com uma interface intuitiva, permitindo a inserção de dados geoespaciais, curvas de precipitação, coeficientes de infiltração e parâmetros de bacias hidrográficas, tornando-o uma ferramenta robusta para estudos hidrológicos.

Sua aplicação é vasta, sendo utilizada por engenheiros civis, hidrólogos, ambientalistas e planejadores urbanos para projetar e avaliar sistemas de drenagem, dimensionar reservatórios e analisar impactos de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos. Além disso, o HEC-HMS pode ser integrado a outros softwares, como o HEC-RAS, para análises mais detalhadas do comportamento da água em cursos d'água e inundações.

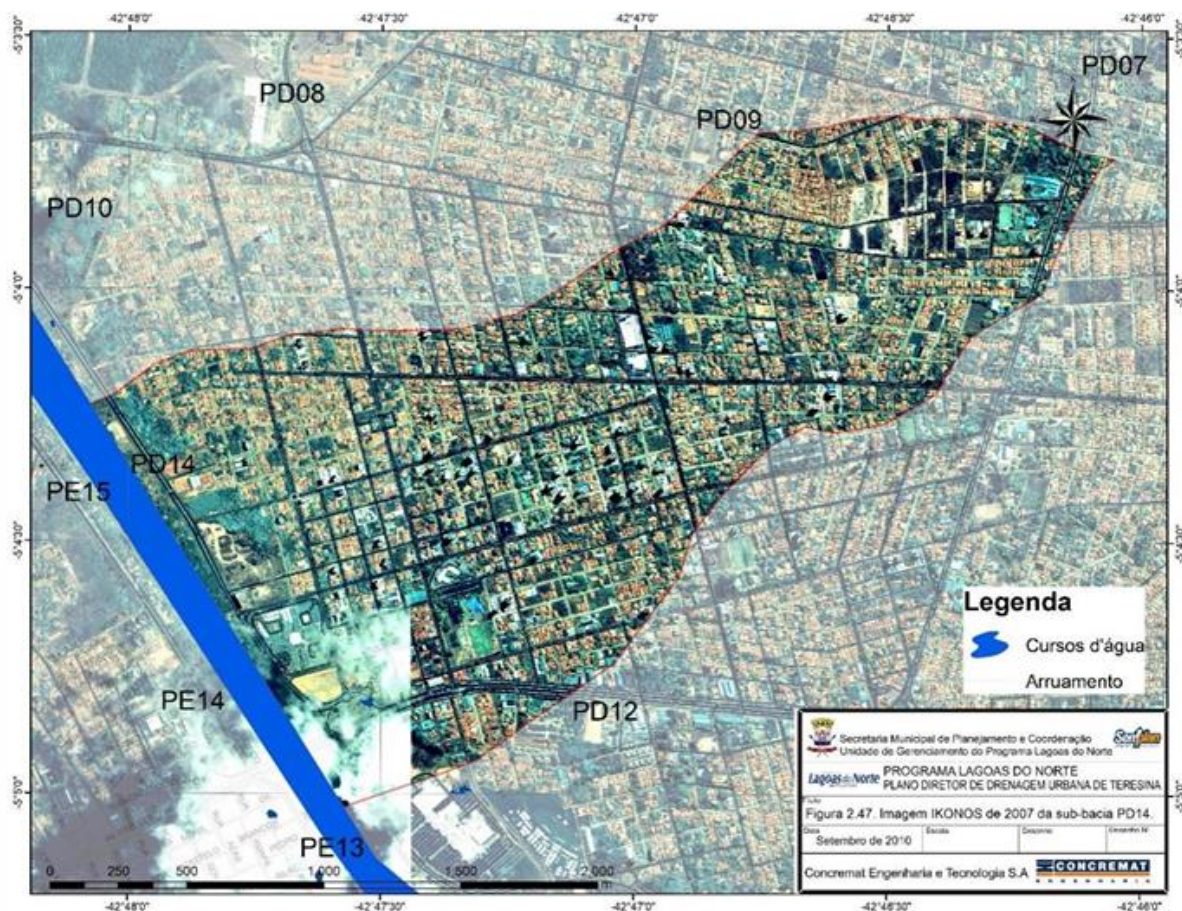
Por ser um software gratuito e amplamente documentado, o HEC-HMS se tornou uma referência mundial em modelagem hidrológica, auxiliando na tomada de decisões relacionadas à gestão de bacias hidrográficas e mitigação de desastres naturais. Seu uso contínuo em projetos acadêmicos e profissionais demonstra sua importância no planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos.

4.0 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

4.1 LOCAL DE ESTUDO – SUB-BACIA PD14

A sub-bacia PD14 localiza-se na zona leste de Teresina, no estado do Piauí, e contribui para o escoamento das águas pluviais em direção ao rio Poti. Outrossim, a PD14 destaca-se por suas características geomorfológicas. Tal região abrange uma área de drenagem de aproximadamente 425 hectares, apresenta um tempo de concentração estimado em 16,89 minutos e um Curve Number (CN) de 87,2, que indica uma significativa impermeabilização do solo (TERESINA, 2012)

Figura 11 – Sub-bacia PD14 em Teresina-PI

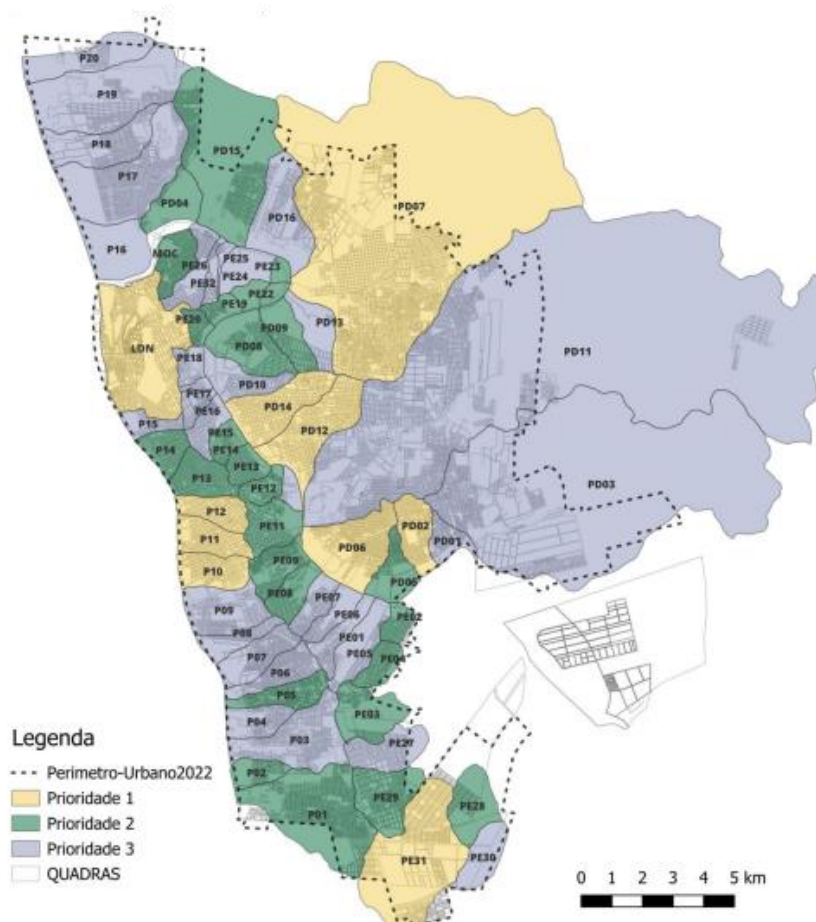


Fonte: Teresina (2010)

Assim, diante de suas peculiaridades, o Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU) (TERESINA, 2010), ao classificar a urgência para a implantação de medidas mitigatórias quanto ao seu aspecto temporal e nível de prioridade, elencou, dentre diversas outras sub-bacias, a PD14 como prioritária e elegível a medidas emergenciais a curto prazo.

Porquanto, sua suscetibilidade a alagamentos advém de sua densa urbanização, do seu suave gradiente topográfico e à ausência de sistemas de drenagem adequados às suas necessidades. (TERESINA, 2010).

Figura 12 – Sub-bacias prioritárias em Teresina-PI

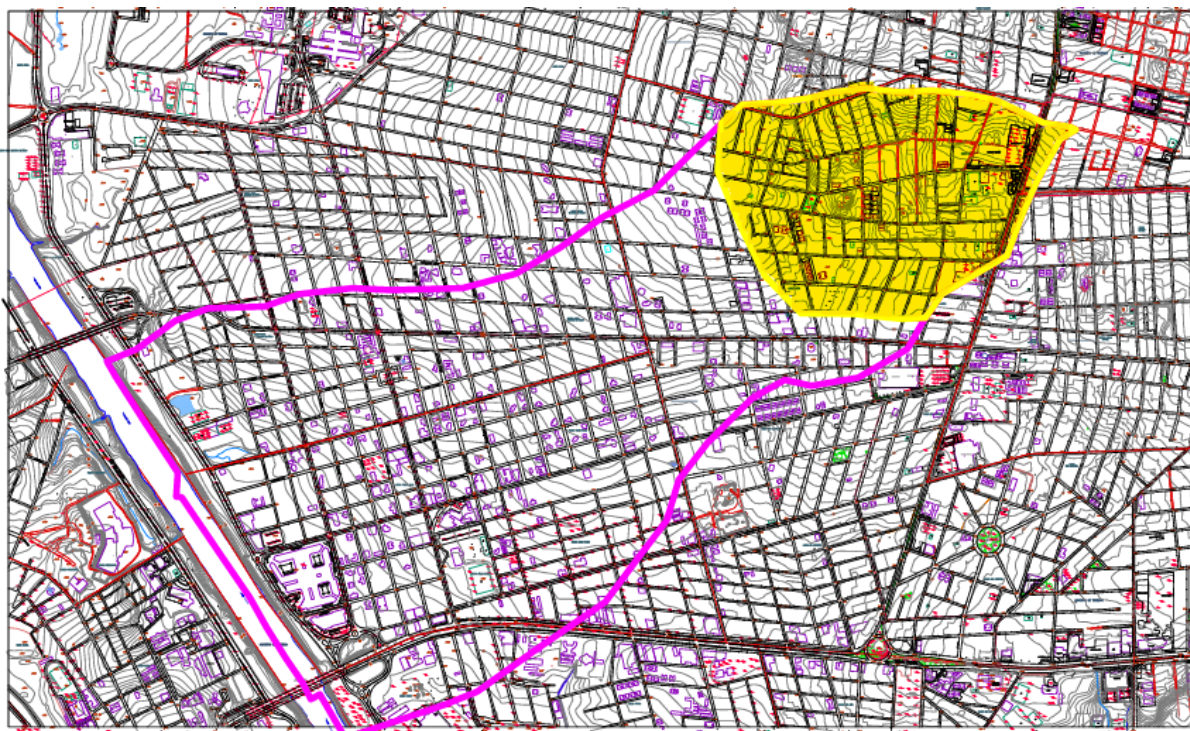


Fonte: TCE (2024)

4.2 ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO

Devido aos critérios e limitações das metodologias abordadas para o dimensionamento preliminar dos reservatórios de detenção e a extensa área da sub-bacia PD14, houve a necessidade de delimitar uma região de estudo específica dentro da sub-bacia com área de menor valor, para melhor adequação aos métodos.

Figura 13 – Delimitação da área de estudo dentro da sub-bacia PD14 – Teresina-PI



Fonte: Autor (2024)

Por essa razão, a área de contribuição demarcada dentro dos limites da PD14 (em amarelo) possui 90,0938 hectares, que representam 0,900938 km², e situa-se a montante da bacia.

Tabela 2 – Dados fisiográficos da área de estudo pertinentes ao dimensionamento do reservatório de retenção

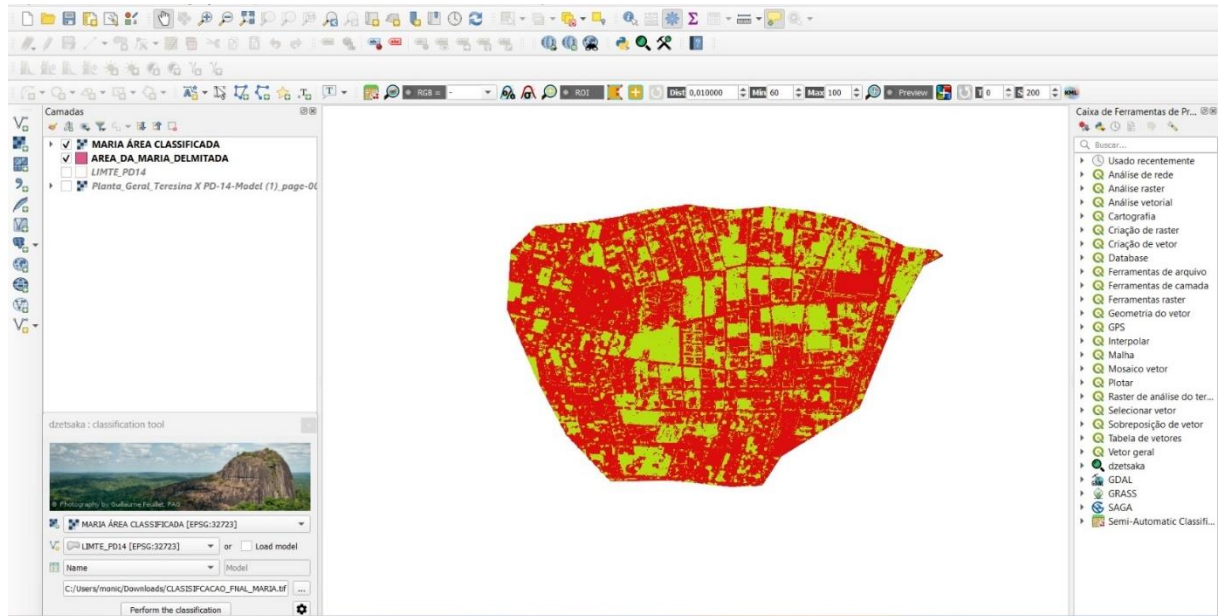
Dados fisiográficos da área de estudo pertinentes ao dimensionamento do reservatório de retenção		
Dado	Unidade	Valor
Área	ha	90,0938
Área Impermeável	%	74,02
Área Permeável	%	25,98
Comprimento do talvegue	m	230,62
Perímetro	m	3743,01
Vazão Pré-Urbanização	m ³ /s	2,81
Declividade	m/m	0,116943

Fonte: Autor (2025)

Convém ressaltar que os dados expostos na Tabela 2 foram obtidos através do Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU-Teresina) e de medições próprias nos

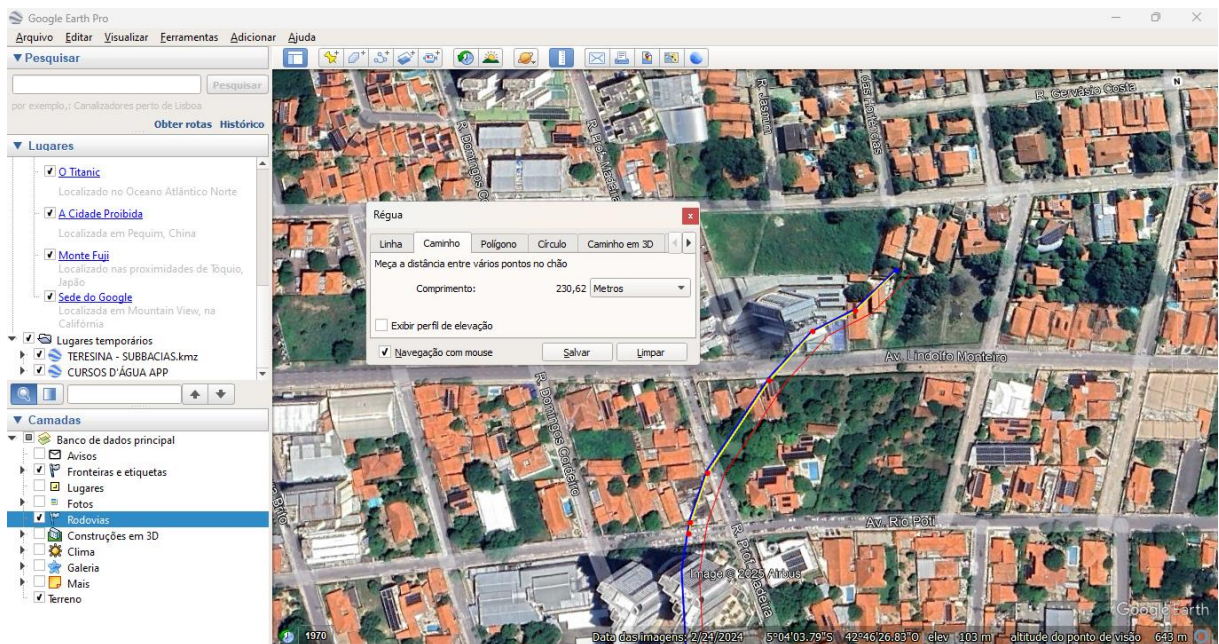
softwares QGIS Versão 3.28.8 e Google Earth (áreas impermeável e permeável e comprimento do talvegue, respectivamente).

Figura 14 – Demarcação das áreas permeáveis (em verde) e impermeáveis (em vermelho) no software QGIS Versão 3.28.8



Fonte: Autor (2025)

Figura 15 – Demarcação do comprimento do talvegue da área de estudo pelo software Google Earth



Fonte: Google Earth (2025)

4.3 OBTENÇÃO DE DADOS RELACIONADOS À PRECIPITAÇÃO

A coleta de dados é um passo primordial para a sintetização de uma pesquisa. Dessa maneira, para tal objetivo, faz-se necessária a identificação de todos os parâmetros hidrológicos e hidráulicos que compõem o dimensionamento preliminar de um reservatório de retenção.

4.3.1 Intensidade da Precipitação – Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

As equações IDF, configuradas conforme as peculiaridades hidrológicas do dado local de aplicação, representam uma expressão matemática capaz de relacionar a intensidade da precipitação com a sua duração e o seu período de retorno. Tal equação é amplamente utilizada no dimensionamento de sistemas de drenagem e no cálculo de vazões máximas em projetos de engenharia hidrológica. Sua forma geral é representada por:

$$i = \frac{a}{(a+b)^c} \quad (5)$$

Onde, (i) é a intensidade de chuva em mm/h, (t) é o tempo de duração da precipitação em minutos e (a), (b) e (c) são coeficiente empíricos determinados por meio de análises estatísticas de séries históricas de precipitações e variam de acordo com a localidade e o tempo de retorno (TR) da chuva.

Segundo Tucci (2008), essa equação é essencial para a previsão de eventos extremos de precipitação e, por consequência, no planejamento de obras hidráulicas, como canais de drenagem, bacias de retenção e galerias pluviais.

Porquanto, os eventos de precipitação do presente estudo foram dimensionados a partir da equação genérica para as curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) de Teresina, explicitada na equação 6, determinada pelo PDDrU (TERESINA, 2010).

$$i = \frac{1194,237 \times TR^{0,1738}}{(t+10)^{0,7457}} \quad (6)$$

Sendo: i = intensidade da chuva (mm/h)

TR = período de retorno (anos)

t = tempo de concentração da bacia (minutos).

Mormente, para o presente estudo foram considerados períodos de retorno TR 10 anos e uma duração t de 60 minutos.

4.3.2 Coeficiente de Deflúvio (C) – Run-Off

O coeficiente de deflúvio (ou coeficiente de escoamento superficial) é um parâmetro adimensional utilizado para expressar a fração da água precipitada que não se infiltra no solo nem é retida por vegetação ou evaporação, escoando diretamente sobre a superfície do terreno. Tal coeficiente varia entre 0 e 1, sendo 0 o escoamento nulo (toda a água infiltra ou evapora) e 1 o escoamento total (toda a água escoa superficialmente).

Conforme descrito por Canholi (2014), o coeficiente de deflúvio é fortemente influenciado pelas características físicas da bacia hidrográfica, como a cobertura do solo, a topografia, o grau de impermeabilização e a capacidade de infiltração do terreno.

Desse modo, a obtenção do coeficiente de deflúvio – ou run-off – é normalmente através de tabelas elaboradas com base nas características de multifárias bacias hidrográficas, como a tabela a seguir, que contém valores recomendados pela ASCE (American Society of Civil Engineers).

Tabela 3 – Valores de Coeficiente de Deflúvio

Valores de C recomendados pela ASCE (1969)		
Superfície	Intervalo	C (Valor esperado)
Pavimento		
Asfalto	0,70 - 0,95	0,83
Concreto	0,80 - 0,95	0,88
Calçadas	0,75 - 0,85	0,8

Telhado	0,75 - 0,95	0,85
Cobertura: grama e solo arenoso		
Pequena declividade (2%)	0,05 - 0,10	0,08
Declividade média (2 a 7%)	0,10 - 0,15	0,13
Forte declividade (7%)	0,15 - 0,20	0,18
Cobertura: grama e solo pesado		
Pequena declividade (2%)	0,15 - 0,17	0,15
Declividade média (2 a 7%)	0,18 - 0,22	0,2
Forte declividade (7%)	0,25 - 0,35	0,3

Fonte: ASCE (1969) adaptado

Em virtude disso, cabe citar que o PDDrU recomenda os valores de 0,15 e 0,95 para cenários de pré-urbanização e pós-urbanização, respectivamente (TERESINA, 2010).

4.3.3 Tempo de Concentração (Tc)

O tempo de concentração é uma propriedade que representa o intervalo necessário para que a água da chuva escoada da região mais distante de uma bacia hidrográfica alcance o ponto de exutório, ou seja, a saída da bacia, como um rio ou canal principal. Em termos práticos, ele indica o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo com escoamento para a seção de interesse, sendo determinante no cálculo da vazão máxima em eventos de precipitação intensa (TUCCI, 2008).

Conforme Chow et al. (1988), o tempo de concentração depende de fatores como a topografia da bacia, o comprimento, a declividade dos cursos d'água, as características do solo e o grau de impermeabilização da superfície. Bacias com declividades acentuadas e solos impermeáveis tendem a apresentar tempos de concentração menores, pois o escoamento ocorre de maneira mais rápida.

O PDDrU, por sua vez, determina o tempo de concentração através do método de Schaake, descrito na Equação 7. Desse

$$t_c = \frac{4,968 \times L^{0,24}}{S^{0,16} \times A_{imp}^{0,026}} \quad (7)$$

Onde: t_c = tempo de concentração (minutos)

L = comprimento médio do talvegue (km)

S = declividade da sub-bacia (m/m)

A_{imp} = fração de área impermeável (adimensional)

Logo, ao fim do cálculo obteve-se um tempo de concentração igual a 5,32 minutos para a área de estudo, mas para fins de simulação, será adotado um $t_c = 6$ minutos.

Faz-se mister citar que, em projetos que envolvem reservatórios, detenções e dispositivos de controle na fonte, o tempo de duração da bacia não pode ser utilizado igual ao tempo de concentração da bacia. Assim, recomenda-se que a duração da chuva de projeto seja, no mínimo, uma vez e meia maior que o tempo de concentração da sub-bacia analisada.

4.4 DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DE RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO

O dimensionamento preliminar de reservatórios de retenção é uma etapa crucial para determinar a viabilidade de execução da estrutura. Conforme o exposto, com o pré-dimensionamento, procura-se obter o volume de retenção e, a partir disso, seguir para as demais etapas de projeto e implementação.

4.4.1 Método da Antiga Lei Complementar nº4724 de 3 de junho de 2015

A metodologia da lei complementar envolve os dados a seguir:

Tabela 4 – Dados preliminares para o método da antiga lei

DADOS PRELIMINARES	
Taxa de Urbanização (%)	74,02
Área Total (ha)	90,09

Fonte: Autor (2025)

Logo, o volume por hectare deve ser calculado da seguinte forma:

$$v = 5,33 \times A_i$$

$$v = 5,33 \times 74,02$$

$$v = 394,52 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Assim, para obter-se o volume total, multiplica-se o volume acima pela área de contribuição em hectares:

$$V_{total} = 394,52 \times 90,09$$

$$V_{total} = 35544,40 \text{ m}^3$$

4.4.2 Método de Tsuchiya (1978)

Na tabela a seguir, são explicitados os dados necessários para o desenvolvimento da equação, considerando um TR=10 anos.

Tabela 5 – Dados preliminares para o método de Tsuchiya

DADOS PRELIMINARES	
Área de Contribuição (ha)	90,09
Coefficiente De Deflúvio Pré-Ocupação	0,15
Coefficiente De Deflúvio Pós-Ocupação	0,95
Duração da Chuva (minutos)	60,00
Duração da Chuva (segundos)	3600,00
Intensidade da Chuva com TR=30 anos (mm/h)	90,77
Intensidade da Chuva Correspondente a Capacidade de Escoamento do Canal a Jusante da Bacia (mm/h)	74,99

Fonte: Autor (2025)

Logo, para obter-se o volume final a ser detido pelo reservatório, deve-se calcular os volumes para dois cenários distintos: pré-urbanização e pós-urbanização.

Desse modo substituindo os valores na equação, tem-se que:

$$V_{pré} = 0,0028 \times \left(i_i - \frac{i_0}{2}\right) \times d_i \times C_{pré} \times A$$

$$V_{pré} = 0,0028 \times \left(30 - \frac{74,99}{2}\right) \times 3600 \times 0,15 \times 90,09$$

$$\mathbf{V_{pré} = 7256,95\ m^3}$$

Por conseguinte, para o cenário pós urbanização, têm-se que:

$$V_{pós} = 0,0028 \times \left(i_i - \frac{i_0}{2}\right) \times d_i \times C_{pós} \times A$$

$$V_{pós} = 0,0028 \times \left(30 - \frac{74,99}{2}\right) \times 3600 \times 0,95 \times 90,09$$

$$\mathbf{V_{pós} = 45960,74\ m^3}$$

Logo, o volume a ser reservado é resultado da diferença entre os volumes $V_{pós}$ e $V_{pré}$:

$$V_{total} = V_{pós} - V_{pré}$$

$$V_{total} = 45960,74 - 7256,95$$

$$\mathbf{V_{total} = 38703,78\ m^3}$$

Assim, conclui-se que o volume útil do reservatório deve ser igual a 38703,78 m³.

4.4.3 Método de Urbonas e Glidden (1982)

Na tabela abaixo, os dados requisitados pelo método de Urbonas e Glidden são apresentados:

Tabela 6 - Dados preliminares para o método de Urbonas e Glidden

DADOS PRELIMINARES	
Área de Contribuição (km ²)	0,90
Área Impermeabilizada (%)	74.02

Fonte: Autor (2025)

A metodologia de Urbonas e Glidden não é capaz de fornecer os cenários de pré e pós urbanização. Além disso, a sua formulação é limitada para tempos e retorno de 10 e 100 anos, conforme mostra o desenvolvimento a equação a seguir:

$$V_{10}=304,8 \times A \times (0,95 \times I - 1,90) \quad V_{10}=304,8 \times A \times (0,95 \times I - 1,90)$$

$$V_{10} = 304,8 \times 0,90 \times (0,95 \times 74,02 - 1,90)$$

$$\mathbf{V_{10} = 33.255,22 \, m^3}$$

Para tempo de retorno igual a 100 anos, têm-se:

$$V_{100} = 304,8 \times A \times (1,78 \times I^2 - 3,56)$$

$$V_{100} = 304,8 \times 0,95 \times (1,78 \times 74,02^2 - 3,56)$$

$$\mathbf{V_{100} = 65.58968,65 \, m^3}$$

Outrossim, o método também fornece equações para a definição das vazões máximas, que se desenvolvidas, resultam nos valores abaixo para TR = 10 anos:

$$Q_{10} = 1,68 \times A$$

$$Q_{10} = 1,68 \times 0,90$$

$$\mathbf{Q_{10} = 1,51 \, m^3/s}$$

Para TR = 100 anos:

$$Q_{100} = 7,00 \times A$$

$$Q_{100} = 7,00 \times 0,90$$

$$Q_{100} = 6,30 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.4.4 Método Racional

Para o método racional, utilizam-se os seguintes dados:

Tabela 7 – Dados preliminares para o método racional

Dados Preliminares	
Coeficiente de Escoamento Superficial Pré-Urbanização	0,15
Coeficiente de Escoamento Superficial Pós-Urbanização	0,95
Intensidade da Chuva (mm/h)	74,99
TR (anos)	10
t (minutos)	60
Área de Contribuição (km²)	0,90

Fonte: Autor (2025)

Para essa metodologia, calculam-se as vazões de escoamento nos cenários de pré e pós urbanização. Assim, para a pré-urbanização têm-se:

$$Q_{pré} = \frac{C_{pré} \times I \times A}{3,6}$$

$$Q_{pré} = \frac{0,15 \times 74,99 \times 0,90}{3,6}$$

$$Q_{pré} = 2,81 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para a pós-urbanização:

$$Q_{pós} = \frac{C_{pós} \times I \times A}{3,6}$$

$$Q_{pós} = \frac{0,95 \times 74,99 \times 0,90}{3,6}$$

$$Q_{pós} = 17,82 \text{ m}^3/\text{s}$$

Com esses valores, portanto, calcula-se o volume a ser detido:

$$V_{det} = (Q_2 - Q_1) \times t \times 60$$

$$V_{det} = (2,81 - 17,82) \times 60 \times 60$$

$$V_{det} = 54050,39 \text{ m}^3$$

Tabela 8 – Volumes obtidos a partir de cada metodologia aplicada

VOLUMES (m³)	
Método Antiga Lei Complementar n° 4724	35544,40
Método de Tsuchiya	38703,79
Método Racional	54050,40
Método de Urbonas e Glidden	33255,22

Fonte: Autor (2025)

4.5 SIMULAÇÃO NO HEC-HMS

Para concluir qual metodologia possui melhor desempenho dada as circunstâncias fisiográficas da área contribuinte e os volumes obtidos através de cada uma, fez-se necessária a simulação no software HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hidrologic Modeling System*), na sua versão 4.12. Assim, inicialmente, fez-se necessária a reunião de alguns dados a serem utilizados na simulação do reservatório.

4.5.1 Abstração Inicial (Initial Abstraction)

No software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), o conceito de "Initial Abstraction" (IA) refere-se ao volume de precipitação que é retido e não contribui imediatamente para o escoamento superficial. Esse volume inclui perdas iniciais como interceptação pela vegetação (chuva retida nas folhas e galhos), depressões no solo (pequenos acúmulos de água em irregularidades do terreno) e infiltração inicial (água absorvida pelo solo antes de iniciar o escoamento).

O "Initial Abstraction" é um parâmetro fundamental no Método do Número da Curva do SCS (Soil Conservation Service), usado para estimar a quantidade de escoamento superficial gerada por uma determinada chuva. Portanto, no modelo do SCS-CN, a IA é frequentemente assumida como 20% da capacidade total de retenção do solo (S), dada pela equação:

$$IA = 0.2 \times S \quad (8)$$

Onde,

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

Na qual S é o número da Curva do SCS (varia de 0 a 100 e depende do tipo de solo, cobertura do solo, uso do solo e umidade antecedente) e CN o *Curve Number* da região, que também varia conforme a morfologia do solo. Logo, para esta simulação, obteve-se uma abstração inicial de 8,96 milímetros.

4.5.2 Tempo de Retardo (*Lag time*)

No software HEC-HMS, o "*Lag Time*" (Tempo de Retardo) é um parâmetro hidrológico que representa o atraso entre o centro de massa da precipitação efetiva e o centro de massa do hidrograma de escoamento resultante em uma bacia hidrográfica. Em outras palavras, é o tempo necessário para que a água precipitada na bacia chegue ao canal principal e comece a escoar significativamente.

O tempo de retardo é um dos principais parâmetros para modelagem hidrológica porque afeta a forma do hidrograma de saída. Ele é utilizado especialmente em métodos de transformação de precipitação em escoamento, como

o Método do Hidrograma Unitário do SCS.

A equação empírica mais utilizada para estimar o Lag Time é:

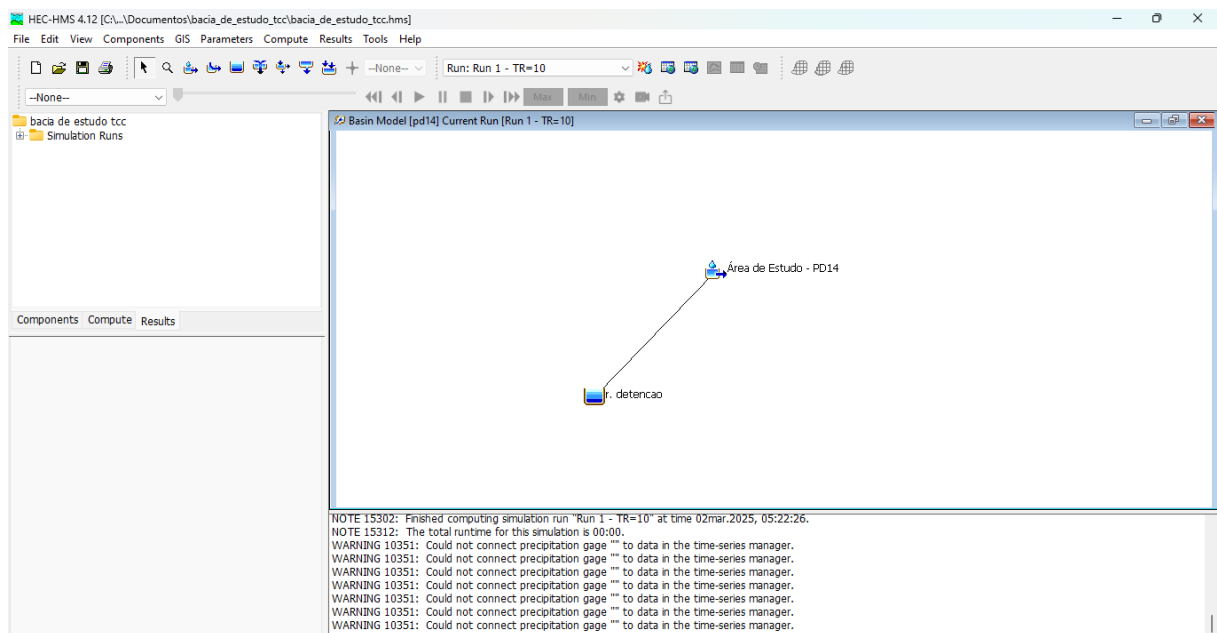
$$Tlag = 0.6 \times tc \quad (10)$$

onde: $Tlag$ = Lag Time (tempo de retardo, em horas)

tc = Tempo de concentração (tempo necessário para que toda a bacia contribua para o escoamento no exultório).

4.5.3 Interface da Simulação

Figura 16 – Interface do HEC-HMS



Fonte: Autor (2025)

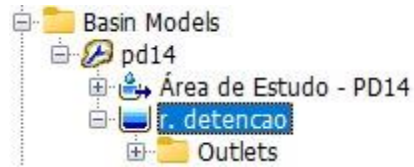
A interface do software apresenta uma visão geral do contexto e da simulação em si, característica inerente da ferramenta. Para o estudo proposto, foi considerada uma precipitação de entrada de TR = 10 anos e uma duração de 60 minutos com um sistema de retenção localizado na cota mais baixa da área delimitada.

4.5.3.1 Configuração do Reservatório de Detenção no REC-HMS

A partir da ferramenta “reservoir”, é possível determinar as características do

reservatório de detenção, como sua cota inicial e o seu sistema extravasor.

Figura 17 – Componentes da modelagem no HEC-HMS



Fonte: Autor (2025)

Figura 18 – Janela de configuração da bacia de detenção no HEC-HMS

Basin Name: pd14	
Element Name: r. detencao	
Description:	
Downstream:	--None--
Method:	Outflow Structures
Storage Method:	Elevation-Storage
*Elev-Stor Function:	c x v
Initial Condition:	Elevation
*Initial Elevation (M)	93.35
Main Tailwater:	Assume None
Auxiliary:	--None--
Time Step Method:	Automatic Adaption
Outlets:	1
Spillways:	0

Fonte: Autor (2025)

Figura 19 – Janela de configuração do sistema extravasor no HEC-HMS

Basin Name: pd14	
Element Name: r. detencao	
Method:	Orifice Outlet
Direction:	Main
Number Barrels:	2
Center Elevation (M)	93.65
Area (M2)	0.28
Coefficient:	0.65

Fonte: Autor (2025)

A modelagem do sistema extravasor deu-se a partir da fórmula de bueiros funcionando como orifícios:

$$Q = A \times C \times \sqrt{2gh} \quad (11)$$

Onde: Q = vazão (m^3/s)

C_d = Coeficiente de descarga

A = Área Círculo (m^2) $\rightarrow D$ = diâmetro (m); $p D^2 / 4$

g = aceleração da gravidade = $9,81 \text{ m/s}^2$

h = carga hidráulica para o centro da tubulação

A determinação do valor de C_d pode ser feita seguindo-se as recomendações de manuais de hidráulica ou dos autores que estudaram e aplicaram os reservatórios de detenção. Desse modo, Nicholas (1995) e Cruz (1998) propõem $C_d = 0,61$, valor também recomendado por Porto (2006). Assim, chegou-se a um extravasor composto por dois orifícios de 0,60 metros.

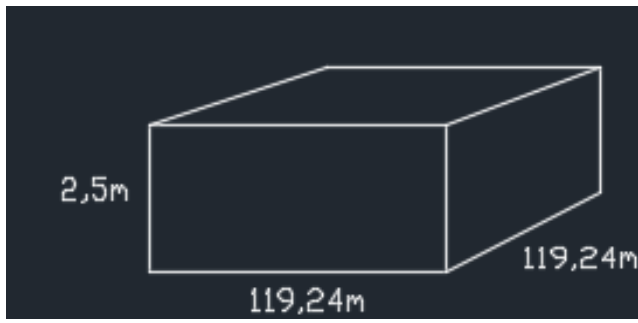
4.5.4 Modelagem do Reservatório de Detenção

Para iniciar a modelagem do reservatório de detenção, já com a precipitação de entrada pronta, elabora-se uma tabela que relacionam a cota e o volume do reservatório. Assim, com base nos volumes obtidos nos métodos de dimensionamento, é possível mensurar dimensões de projeto para tais reservatórios, para fins de simulação. Foi definida uma altura máxima de 2,5 m para todos os reservatórios e as cotas foram pontuadas a cada 0,25 metros a partir da cota mais baixa da área de estudo.

4.5.4.1 Método da Antiga Lei Complementar nº4724 de 3 de junho de 2015

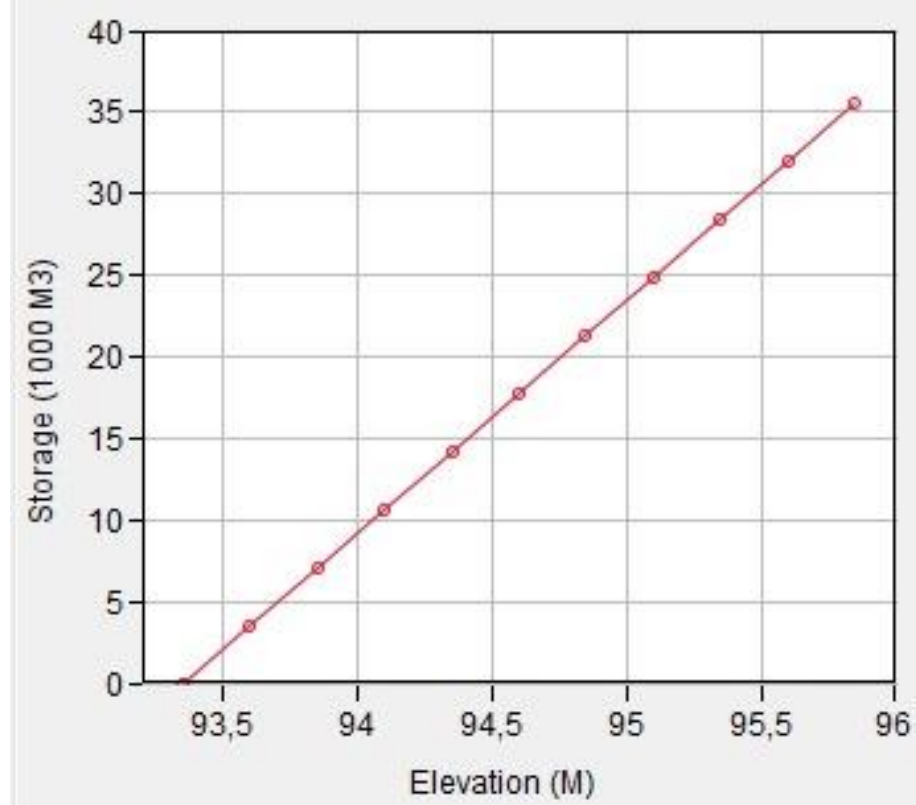
Tabela 9 – Relação cota x volume para o método da antiga lei complementar

Cota x Volume (Método Antigo)				
Volume Método Antigo (m³)	35544,4	Cota (m)	Volume (m³)	Volume/100
Altura do Reservatório (m)	0	93,35	0	0,00
L*L	14217,76	93,6	3554,44	3,55
L1(m)	119,24	93,85	7108,88	7,11
L2(m)	119,24	94,1	10663,32	10,66
		0,25	14217,76	14,22
		0,5	17772,20	17,77
		0,75	21326,64	21,33
		1	24881,08	24,88
		1,25	28435,52	28,44
		1,5	31989,96	31,99
		1,75	35544,40	35,54



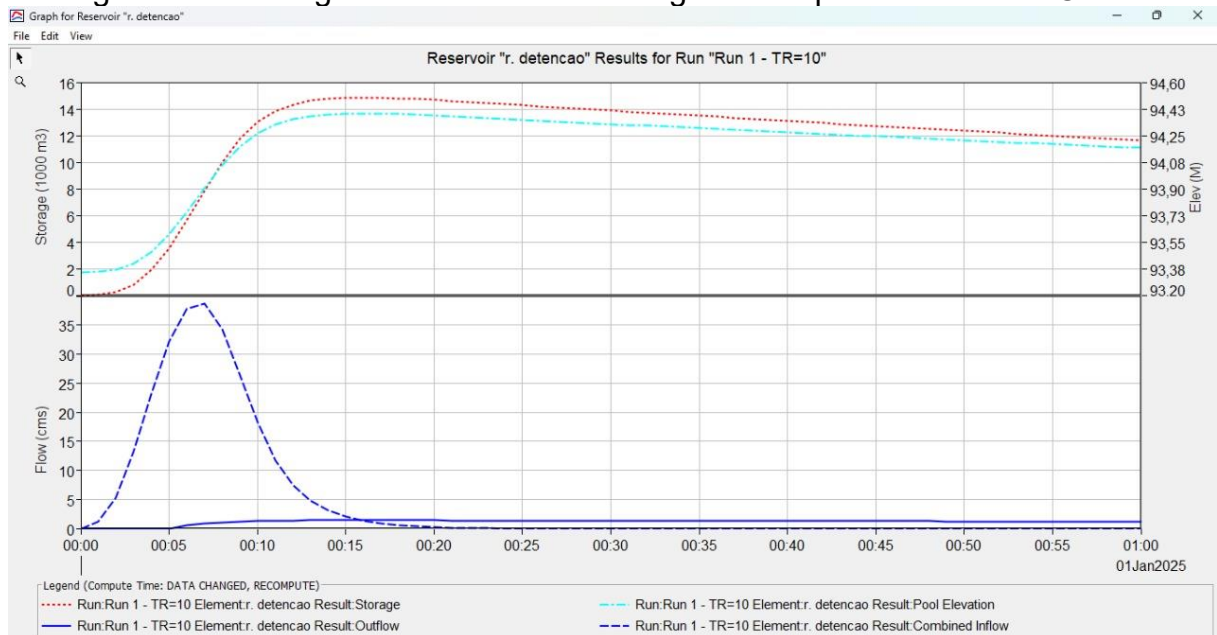
Fonte: Autor (2025)

Figura 20 – Gráfico cota x volume no HEC-HMS para o método antigo



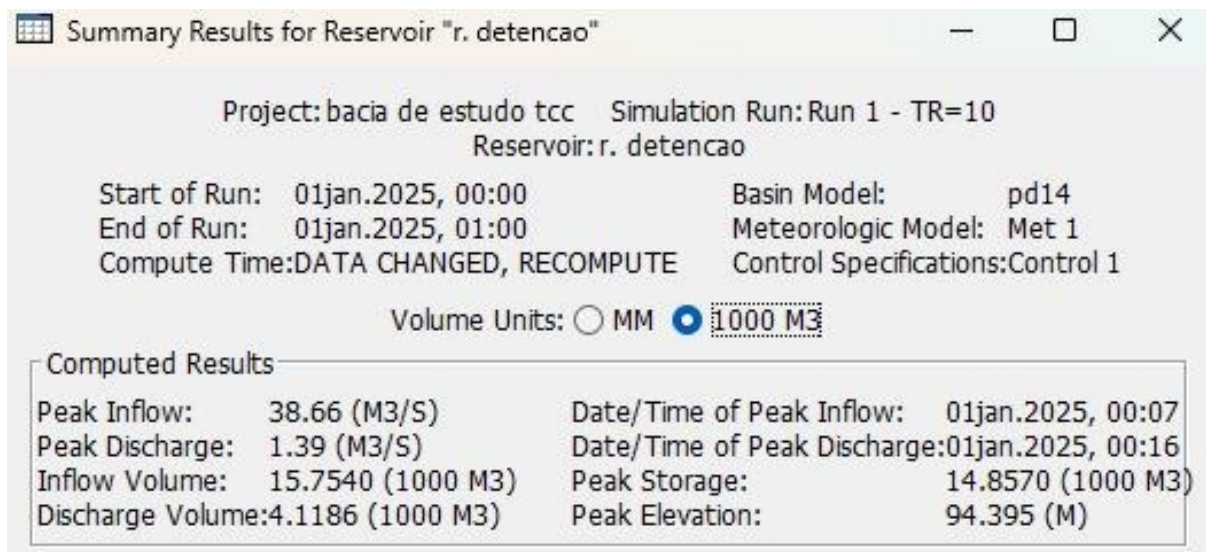
Fonte: Autor (2025)

Figura 21 – Hidrograma do método da antiga lei complementar no HEC-HMS



Fonte: Autor (2025)

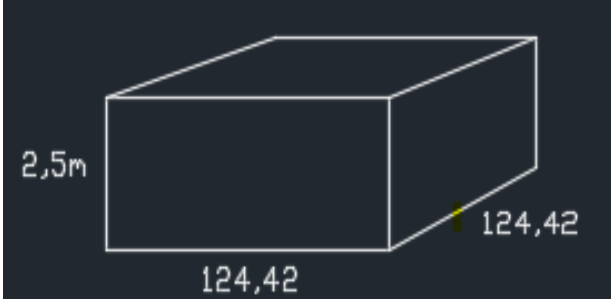
Figura 22 – Tabela resumo do reservatório pelo método antigo



Fonte: Autor (2025)

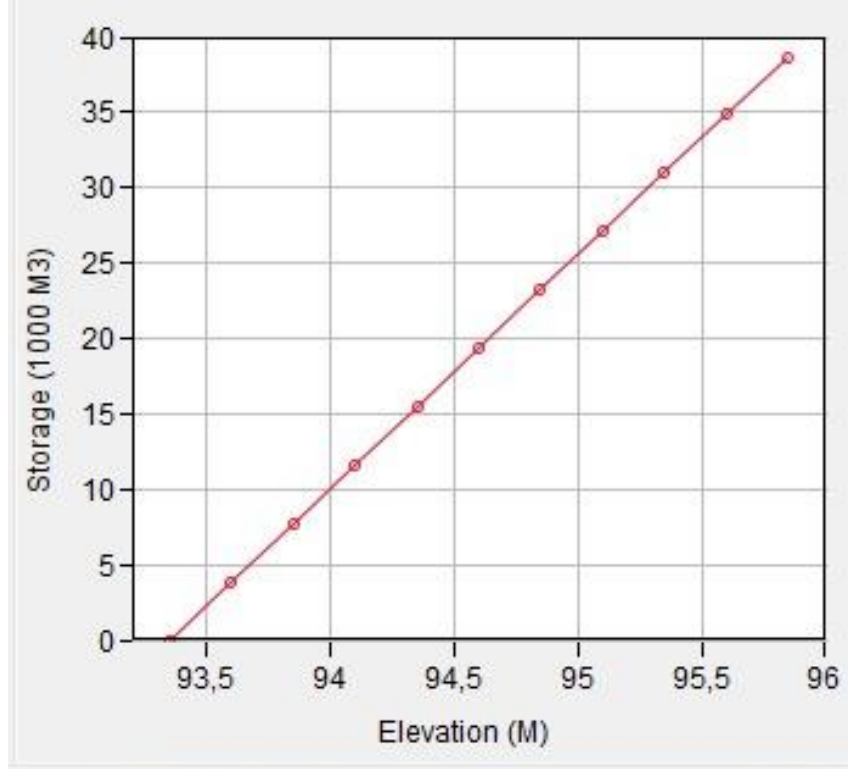
4.5.4.2 Método de Tsuchiya

Tabela 10 - Relação cota x volume para o método de Tsuchiya

Cota x Volume (Método Tsuchiya)				
Volume Método Tsuchiya (m³)	38703,79	Cota (m)	Volume (m³)	Volume/1000
Altura do Reservatório (m)	2,50	93,35	0	0,00
L*L	15481,51	93,6	3870,38	3,87
L1(m)	124,42	93,85	7740,76	7,74
L2(m)	124,42	94,1	11611,14	11,61
		0,25	15481,51	15,48
		0,5	19351,89	19,35
		0,75	23222,27	23,22
		1	27092,65	27,09
		1,25	30963,03	30,96
		1,5	34833,41	34,83
		1,75	38703,79	38,70

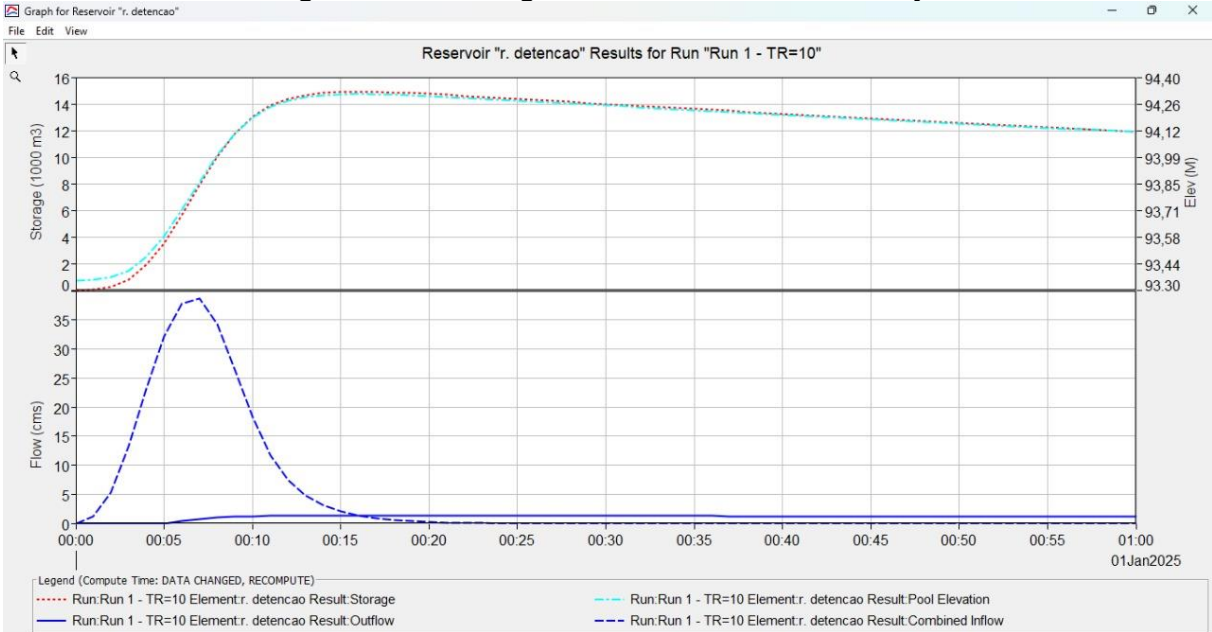
Fonte: Autor (2025)

Figura 23 – Gráfico cota x volume no HEC-HMS para de Tsuchiya



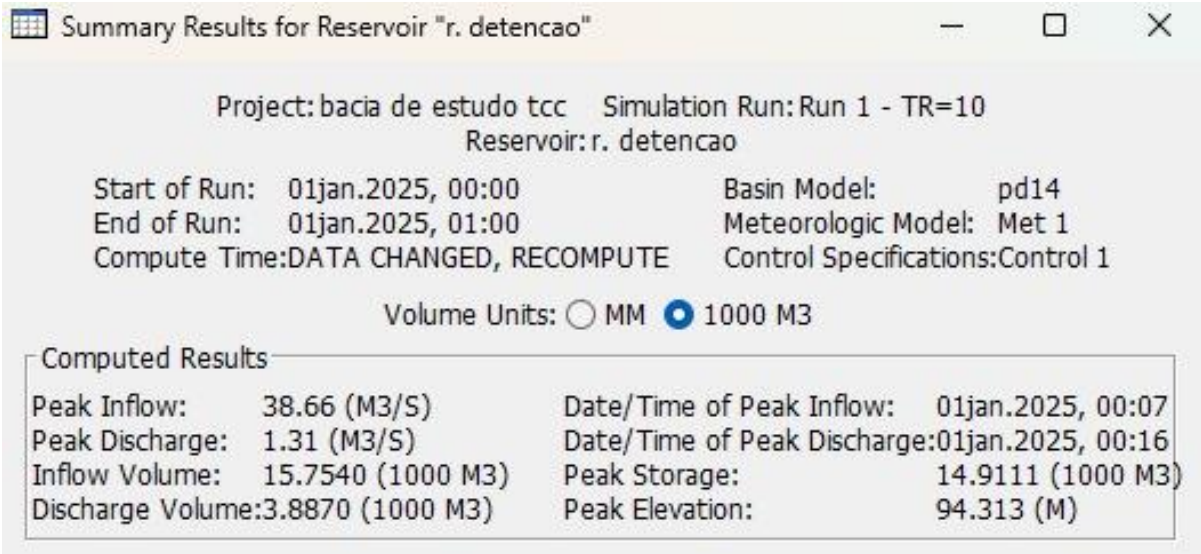
Fonte: Autor (2025)

Figura 24 – Hidrograma do método de Tsuchiya



Fonte: Autor (2025)

Figura 25 – Tabela resumo do reservatório pelo método de Tsuchi

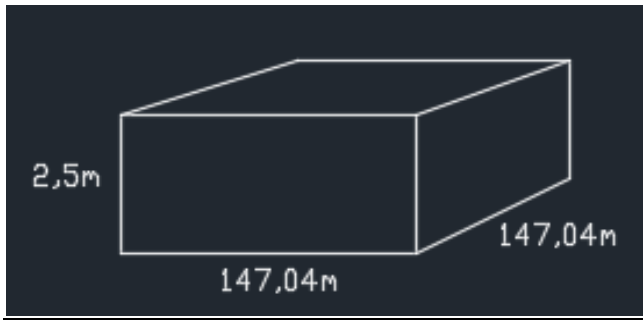


Fonte: Autor (2025)

4.5.4.3 Método Racional

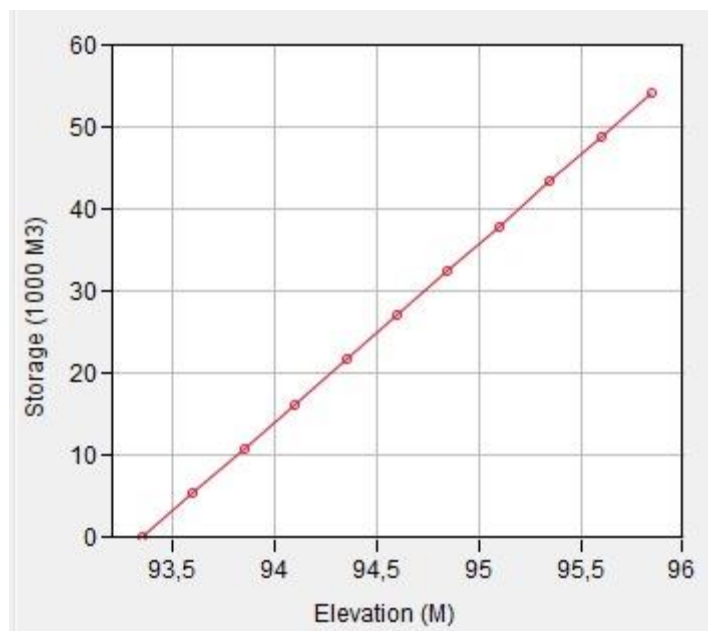
Tabela 11 - Relação cota x volume para o método racional

Cota x Volume (Método Racional)				
Volume Método Racional (m³)	54050,4	Cota (m)	Volume (m³)	Volume/100
Altura do Reservatório (m)	0	93,35	0	0,00
L*L	21620,1	93,6	5405,04	5,41
L 1(m)	6	93,85	10810,08	10,81
L 2 (m)	147,04	94,1	16215,12	16,22
		94,35	21620,16	21,62
		94,6	27025,20	27,03
		94,85	32430,24	32,43
		95,1	37835,28	37,84
		95,35	43240,32	43,24
		95,6	48645,36	48,65
		95,85	54050,40	54,05



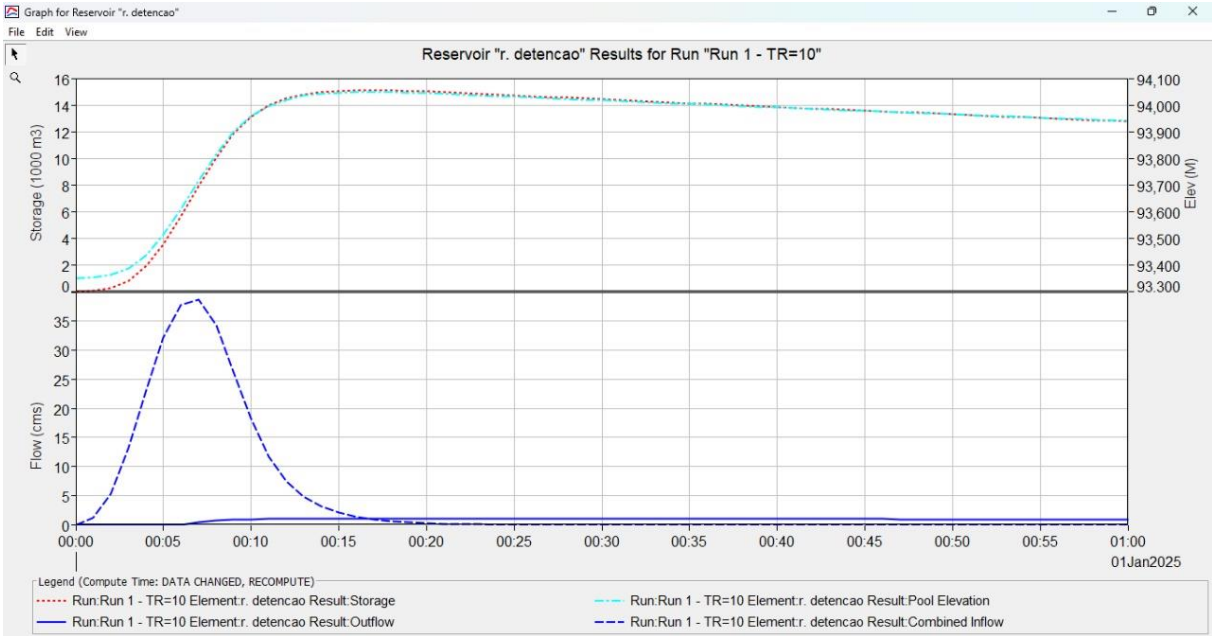
Fonte: Autor (2025)

Figura 26 – Gráfico cota x volume no HEC-HMS para o método racional



Fonte: Autor (2025)

Figura 27 – Hidrograma do método racional



Fonte: Autor (2025)

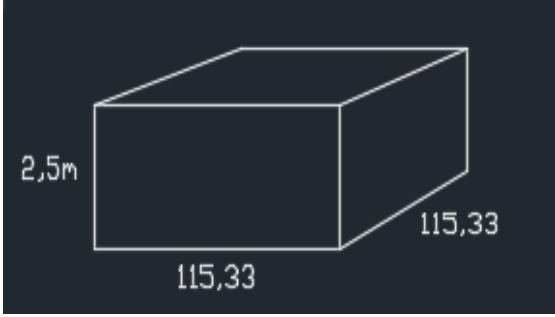
Figura 28 – Tabela resumo do reservatório no método racional



Fonte: Autor (2025)

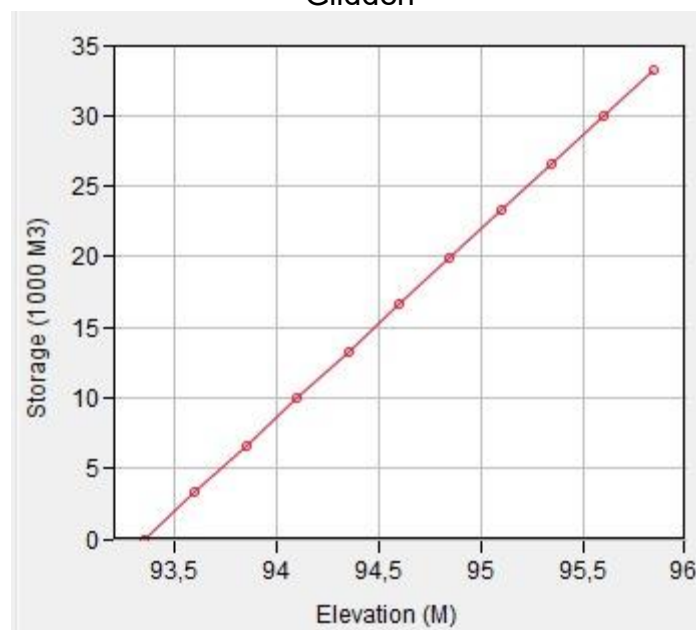
4.5.4.4 Método de Urbonas e Glidden

Tabela 12 - Relação cota x volume para o método de Urbonas e Glidden

Cota x Volume (Método Urbonas e Glidden)				
Volume Método Urbonas e Glidden (m³)	33255,22	Cota (m)	Volume (m³)	Volume/1000
Altura do Reservatório (m)	2,5	93,35	0	0,00
L*L	13302,09	93,6	3325,52	3,33
L1(m)	115,33	93,85	6651,04	6,65
L2(m)	115,33	94,1	9976,57	9,98
		0,25	13302,09	13,30
		0,5	16627,61	16,63
		0,75	19953,13	19,95
		1	23278,66	23,28
		1,25	26604,18	26,60
		1,5	29929,70	29,93
		1,75	33255,22	33,26

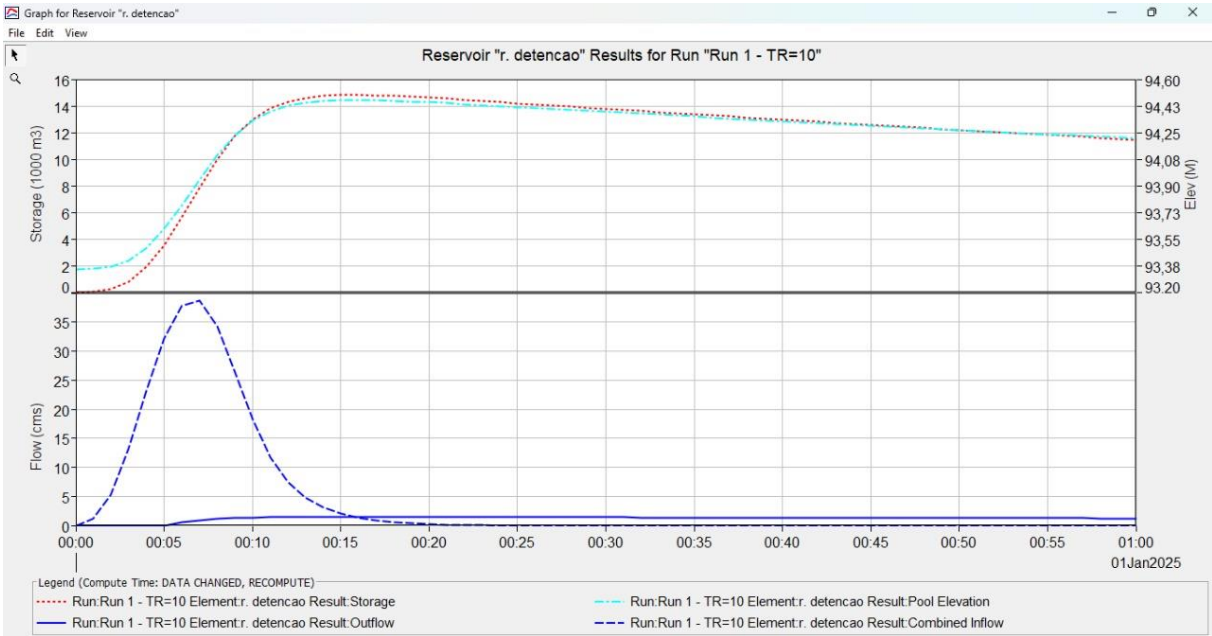
Fonte: Autor (2025)

Figura 29 – Gráfico cota x volume no HEC-HMS para o método de Urbonas e Glidden



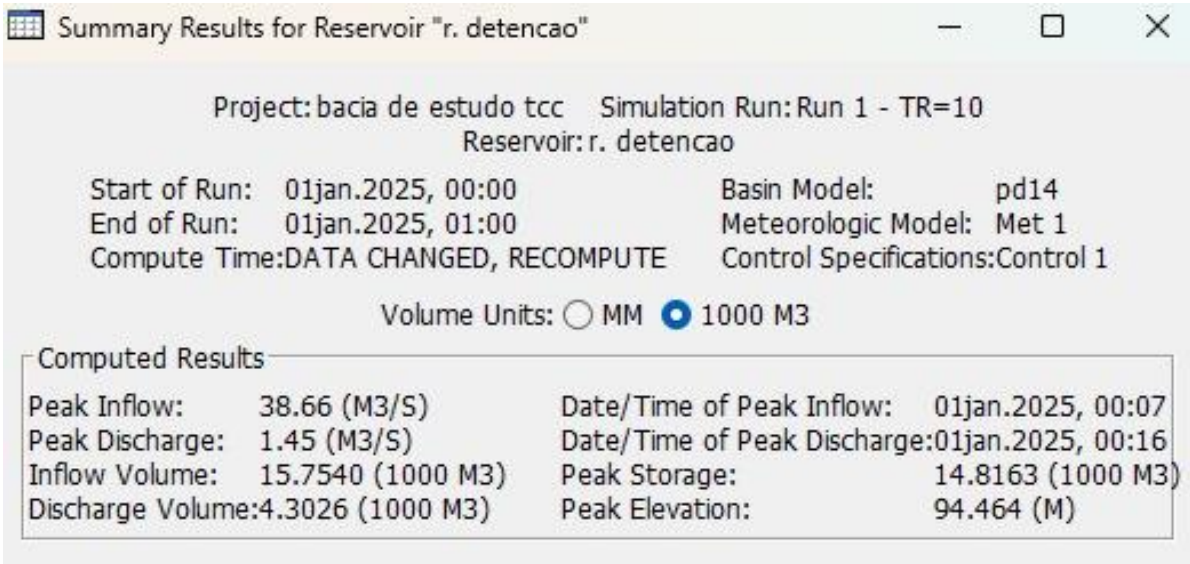
Fonte: Autor (2025)

Figura 30 – Hidrograma do método de Urbonas e Glidden



Fonte: Autor (2025)

Figura 31 – Tabela resumo do reservatório no método de Urbonas e Glidden



Fonte: Autor (2025)

6.0 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos a partir da utilização dos 4 métodos distintos para uma mesma área de estudo, é possível concluir que a implementação de um

reservatório de detenção exige uma análise complexa e completa das variáveis que interferem no ciclo hidrológico e, por conseguinte, na drenagem urbana pluvial.

Desse modo, os métodos estudados mostram resultados que variam conforme a quantidade de dados que são capazes de relacionar. Inicialmente, o Método da Antiga Lei Complementar nº4724 de 3 de junho de 2015 designou um volume de 35544,40 m³. Cabe ressaltar que o método da Antiga Lei é em função somente da área impermeável da bacia de contribuição, logo, não é capaz de relacionar cenários de pré e pós urbanização e tampouco considerar tempos de retorno e durações distintas. Ademais, possui limitação de área, na qual deve ser considerada valores abaixo de 100 hectares, conforme é citado na lei.

Analogamente, o Método de Urbonas e Glidden, apresenta resultados semelhantes às demais metodologias, e está em função de apenas duas variáveis, a área total de contribuição e a porcentagem de impermeabilização, o que, assim como o método da Antiga Lei, não permite considerar outras variações importantes na hidrologia. Em contrapartida, esse é o único método que não possui limitações relacionadas a área de contribuição e permite o uso em bacia de grandes dimensões.

Por conseguinte, o Método Racional, por relacionar diversas variáveis, é capaz de levar em consideração tempos de retorno, durações e intensidades distintas, e ainda permite pôr em comparação os cenários pré e pós urbanização. No entanto, assim como o método da Antiga Lei e o Método de Tsuchiya, possui uma limitação de área de 200 hectares.

Finalmente, o Método de Tsuchiya, abordado na nova lei vigente, consegue trabalhar com uma quantidade de valores semelhante ao Método Racional e possibilita ser manipulado para diversos cenários de precipitação, os quais variam quanto ao tempo de retorno, a duração, a intensidade e o coeficiente de deflúvio, além de permitir comparar os cenários de pré e pós urbanização. Contudo, também apresenta uma limitação de área, a qual permite trabalhar apenas com 100 hectares.

Com base nas simulações de cada método foi possível determinar a vazão de saída do sistema extravasor de cada reservatório. A vazão de saída, por conseguinte deve ser menor ou igual a vazão pré-urbanização da área de estudo. Assim, com base na tabela abaixo pode-se constatar os respectivos valores de vazão do orifício.

Tabela 13 – Vazão de descarga em cada método

VAZÃO DE SAÍDA DO RESERVATÓRIO (m ³ /s)	
Método Antiga Lei Complementar n° 4724	1,39
Método de Tsuchiya	1,31
Método Racional	1,02
Método de Urbonas e Glidden	1,45

Fonte: Autor (2025)

Conclui-se, portanto, que todos os métodos avaliados apresentam resultados satisfatórios, vide suas respectivas vazões de descarga que são inferiores a vazão pré-urbanização da região estudada, conforme o apresentado na tabela 2. Diante disso, a escolha do método ideal deve ser baseada no volume de detenção do reservatório.

Portanto, a metodologia aplicada deve ser a de Urbonas e Glidden, que apesar de ter a maior vazão de descarga, apresentou o menor volume útil dentre os métodos analisados. Um menor volume, por sua vez, permite que o reservatório se disponha de uma menor área de instalação e, por conseguinte, permite uma maior economia de recursos financeiros e naturais.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Y. R. V.; OLIVEIRA, H. M. Os impactos das mudanças climáticas em áreas urbanas. In: NUNES, M. S. (org.). **Estudos em Direito Ambiental**: desenvolvimento, desastres e regulação. Campina Grande: Editora Licuri, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Soluções para Cidades**: Manual de calçadas, pavimentos e drenagem urbana. São Paulo: ABCP, 2013

BEDIENT, P. B.; HUBER, W. C. **Hydrology and floodplain analysis**. Pearson Education, 2012.

BRAGA, R. P. *et al.* **Drenagem urbana: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

CABRAL, L. N.; CÂNDIDO, G. A. Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: relações conceituais e compreensões de causa e efeito. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, e20180124, p. 1-13, 2019.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. Disponível em: <https://www.uel.br/laboratorios/lapege/pages/arquivos/Hidrografia%202020/Texto%203%20-%20Gestao%20das%20Aguas%20Urbanas.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2025.

FRANCO, E. J. **Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, 2004. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/2136>. Acesso em: 30 jan. 2025.

GEORGIA DEPARTMENT OF ENVIRONMENT (GDOE). **Stormwater Management Manual**. 2001. Disponível em: <https://epd.georgia.gov/stormwater-management-manual>. Acesso em: 30 jan. 2025.

LEFEBVRE, H. **A revolução urbana**. Tradução de Jaci Augusto Porto. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1972.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. **Water resource systems planning and analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.

JAMES, W.; HUBER, W. C.; DICKINSON, R.; RAJA SEGARAN, H. R. Calibration and validation of urban stormwater models. **Journal of Water Management Modeling**, v. 18, 2010.

MARICATO, E. Metrôpole na periferia do capitalismo: ilegalidade, desigualdade e violência. **Oculum Ensaios**, n. 4, p. 7-19, 2000.

MCCUEN, R. H. **Hydrologic Analysis and Design**. Pearson, 2016.

MENDES, A. T. Precisamos desenterrar a drenagem urbana no Brasil. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental (BRUA)**, n. 29, p. 111-114, 2023.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, J. M.; CANEDO DE MAGALHÃES, P. R. **Drenagem Urbana**: gerenciamento simulado da expansão urbana. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MOURA, M. de O.; CUNICO, C.; LUCENA, D. B. (org.). **Riscos, vulnerabilidades e desastres socioambientais**: concepções e estudos de caso. João Pessoa: Editora UFPB, 2023.

PORTO, R. L. **Hidráulica aplicada**. São Paulo: Blucher, 2006.

RODRIGUES NETO, E. X.; LIMA, A. J. Inundações em Teresina-Piauí: uma questão socio-histórica. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, [S. l.], v. 11, 2019.

SANGAL, S. K. *et al.* **Urban Drainage**. New Delhi: Springer, 2017. Disponível em: <https://www.springer.com/>. Acesso em: 30 jan. 2025.

SANTOS, L. P. R. **Mapeamento de área suscetível a cheia utilizando modelagem e simulação hidrológica: área a jusante da sub-bacia PD14**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal do Piauí, Teresina, 2024.

SCHAAKE, J. C. A Mathematical Model for Estimating Time of Concentration in Small Drainage Basins. **Journal of Hydrology**, 1967. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/SfqYWrhrtvkxybFsJYQtx7v/?format=pdf>. Acesso em: 30 jan. 2025.

SILVA, J. P. *et al.* Application of Tsuchiya's Method for Detention Pond Design in a Brazilian Urban Area. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2015.

SCHUELER, T. R.; HIRSCHMAN, D. J.; NOVOTNEY, M. A. **Stormwater BMP Design Supplement for Executive Districts**. Ellicott City: Center for Watershed Protection, 2009.

SPERLING, M. Von. **Estudos e modelagem da qualidade da água em rios**. Belo Horizonte: DESA, 2007.

TERESINA. Prefeitura Municipal. **Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU)**. Teresina: PMT, 2010.

_____. **Lei Complementar nº 4.724, de 3 de junho de 2015**: Diretrizes para o controle dos impactos da drenagem urbana de novos empreendimentos [...]. Teresina: Diário Oficial do Município, 2015.

_____. **Lei Complementar nº 5.481, de 20 de dezembro de 2019**: Plano Diretor de Ordenamento Territorial de Teresina. Teresina: Prefeitura Municipal, 2019.

_____. **Lei Complementar nº 6.105, de 7 de junho de 2024**: Altera dispositivos da Lei Complementar nº 4.724/2015 e institui o Fundo Municipal de Drenagem Urbana [...]. Teresina: Diário Oficial do Município, 2024.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO PIAUÍ. **Gestão da Drenagem Urbana em Teresina**. 2024. Disponível em: <https://www.tcepi.tc.br/wp-content/uploads/2024/07/TC-no-0013192024.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2025.

TSUCHIYA, M. **Runoff analysis and flood control**. Tokyo: Kobundo, 1978.

TSUCHIYA, M. Urban flood control by detention storage. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON URBAN HYDROLOGY, HYDRAULICS AND SEDIMENT CONTROL, 1974, Lexington. **Proceedings** [...]. Lexington: University of Kentucky, 1974. p. 27-37.

TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana e Controle de Inundações. Porto Alegre: **ABRH**, 2008.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia urbana. Porto Alegre: **ABRH**, 2017.

URBONAS, B.; GLIDDEN, J. W. Stormwater runoff control. **Englewood Cliffs**, NJ: Prentice-Hall, 1982.

VALENTE, O. F. **Alagamentos urbanos**. EcoDebate, 2011. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br>. Acesso em: 30 jan. 2025.

VILAÇA, F. **Espaço intra-urbano no Brasil**. São Paulo: Studio Nobel: FAPESP, 2001.

WONG, T. H. F. Water Sensitive Urban Design: the journey thus far. **Australian Journal of Water Resources**, v. 10, n. 3, p. 213-222, 2006.

WYCOFF, R. L.; SINGH, V. P. A Regression Model for Estimating Storage Requirements for Flood Control Reservoirs. **Water Resources Bulletin**, v. 12, n. 2, p. 401-409, 1976.