



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO ACADÊMICO EM RECURSOS HÍDRICOS

GUSTAVO SIEBRA LOPES

**PREDIÇÃO DE EXTRAVASAMENTOS DEVIDO À INFILTRAÇÃO DE ÁGUAS
PLUVIAIS EM INTERCEPTOR DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE
FORTALEZA/CE**

FORTALEZA

2024

GUSTAVO SIEBRA LOPES

PREDIÇÃO DE EXTRAVASAMENTOS DEVIDO À INFILTRAÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS
EM INTERCEPTOR DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE FORTALEZA/CE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

Coorientadora: Prof. Dr^a. Janine Brandão de Farias Mesquita

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L852p Lopes, Gustavo Siebra.
Predição de extravasamentos devido à infiltração de águas pluviais em interceptor de esgotamento sanitário de Fortaleza/CE / Gustavo Siebra Lopes. – 2024.
70 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Iran Eduardo Lima Neto.
Coorientação: Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita .

1. Modelagem hidrológica. 2. RDII. 3. RTK. 4. PCSWMM. I. Título.

CDD 530.07

GUSTAVO SIEBRA LOPES

PREDIÇÃO DE EXTRAVASAMENTOS DEVIDO À INFILTRAÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS
EM INTERCEPTOR DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE FORTALEZA/CE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Recursos Hídricos

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr^a. Janine Brandão de Farias
Mesquita (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. John Kenedy de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Silvano Porto Pereira
Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)

À minha família, por acreditar e investir em mim. Esposa, por seu amor e apoio incondicional. Mãe, por seu cuidado e dedicação. Pai, por sua presença que traz segurança. Sogra, por seu carinho e apoio constante.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre guiou meus passos.

Ao meu orientador, o Prof. Iran Eduardo Lima Neto, pela excelente orientação, presteza, paciência, conselhos e amizade, por atender além das minhas expectativas, obrigado por acreditar no meu potencial em desenvolver este trabalho.

A coorientadora Janine Brandão por toda gentileza, paciência e disponibilidade em ensinar e ajudar.

Aos membros da banca pela disponibilidade e por aceitarem o convite.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) por me proporcionar o conhecimento e aprendizado, especialmente ao Cleiton Silveira, pela amizade e conselhos, por sempre ser tão disponível e acessível na prestação de ajuda a todos. A secretária executiva, Shirley pela competência e presteza.

Aos colegas David Arruda, Eduardo Lima, Monique Oliveira e Bruno que dividiram salas de aula e convívio no Laboratório de Recursos Hídricos (LRH), como também compartilharam as dificuldades e as alegrias de cursar o mestrado, o caminho não teria sido o mesmo sem vocês.

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) por disponibilizar apoio técnico, material e pessoas, especialmente a Cailiny Medeiros, Claudiane Bezerra, João Cavalcante e Daniel Pereira.

A *Computational Hydraulics International (CHI)* por fornecer a licença estudantil do *software Personal Computer Storm Water Management Mode (PCSWMM)*.

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUN-CAP) pela concessão da bolsa de estudos para a realização deste mestrado.

Gratidão a minha esposa Ana Cândida Oliveira pelo apoio, atenção, carinho e amor. Aos meus pais, Valderi Siebra e Marquesa Siebra, pela dedicação, educação e apoio de sempre. A minha Sogra, Maria das Graças Oliveira (*in memoriam*) pela sua força, bondade, simplicidade e humildade, sua história de vida é inspiração. Aos velhos amigos que sempre estiveram ao meu lado.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste percurso, agradeço.

"Não importa o quão difícil ou impossível seja,
nunca perca de vista seu objetivo."

(Monkey D. Luffy, One Piece)

RESUMO

O progresso de um país está intimamente ligado à qualidade de sua infraestrutura de serviços de água, esgoto, drenagem e resíduos sólidos. Este estudo foca na bacia da Vertente Marítima de Fortaleza, no Ceará, região Nordeste do Brasil, que enfrenta escassez hídrica e fragilidade dos recursos naturais típicas do clima semiárido. A área tem experimentado uma rápida expansão urbana, resultando em sérios desafios para os sistemas de drenagem e esgotamento sanitário, como inundações e poluição das águas. A entrada de águas pluviais no sistema de esgoto, denominada afluência indevida, compromete a eficiência do sistema, causando extravasamentos e contaminação ambiental. Diante disso, o objetivo geral consiste uma metodologia para simulação e otimização de redes coletoras de esgoto submetidas a contribuições pluviais e de lençol freático em ambientes urbanizados. O traçado e a batimetria do Interceptor Leste (IL) foram atualizados para realizar a modelagem hidrológica-hidráulica, foram utilizados dados pluviométricos da estação Edson Queiroz, coletados entre 2018 e 2023. A metodologia *Rainfall-to-Kinematic Flow* (RTK) foi aplicada para estimar o *Rainfall Derived Infiltration and Inflow* (RDII), identificando pontos críticos do sistema sujeitos a falhas e sobrecargas. Após validar o cenário com R ótimo, foi aplicada a equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para diferentes períodos de retorno. Os resultados do trabalho mostraram que o *Personal Computer Storm Water Management Mode* (PCSWMM) possui uma interface simplificada e intuitiva, com integração ao QGIS. Na fase de calibração do modelo, foram simulados 16 dias para 2, 4, 8, 10, 25 e 35 sub-bacias com diferentes valores de R. Na fase de validação, foram simulados 65 dias para 2 sub-bacias, comparando os resultados com o relatório da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE). A melhor acurácia foi alcançada com duas sub-bacias, apresentando resultados superiores a 75% para R igual a 0,01. Para tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos, o valor de R igual a 0,01 manteve o melhor desempenho, mesmo com o aumento significativo do volume de água. Como proposta de melhoria na rede, recomenda-se o uso de medidas estruturais e não-estruturais. Concluiu-se que o modelo se mostrou adequado à realidade de Fortaleza, podendo ser utilizado como ferramenta prática para a previsão de extravasamento na rede de esgoto. Espera-se que a metodologia proposta possa também ser aplicada em outras cidades com características semelhantes.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica-hidráulica. RTK. RDII. PCSWMM.

ABSTRACT

The progress of a country is closely tied to the quality of its water, sewage, drainage, and solid waste infrastructure. This study focuses on the Vertente Marítima Basin in Fortaleza, Ceará, a region in the semi-arid Northeast of Brazil that faces water scarcity and natural resource vulnerability. The area has undergone rapid urban expansion, leading to significant challenges for drainage and sewage systems, such as flooding and water pollution. The entry of stormwater into the sewage system, known as illicit inflow, compromises system efficiency, causing overflows and environmental contamination. In light of this, the general objective is to develop a methodology for the simulation and optimization of sewer networks subjected to stormwater and groundwater inflows in urbanized environments. The layout and bathymetry of the East Interceptor (IL) were updated to conduct hydrological-hydraulic modeling, using rainfall data from the Edson Queiroz station, collected between 2018 and 2023. The Rainfall-to-Kinematic Flow (RTK) method was applied to estimate the Rainfall Derived Infiltration and Inflow (RDII), identifying critical system points prone to failure and overload. After validating the scenario with the optimal R value, the Intensity-Duration-Frequency (IDF) equation was applied for different return periods. Results indicated that the Personal Computer Storm Water Management Model (PCSWMM) has a simplified and intuitive interface with integration to QGIS. During model calibration, simulations were performed for 16 days across 2, 4, 8, 10, 25, and 35 sub-basins with varying R values. In the validation phase, 65 days were simulated for two sub-basins, comparing results with data from the Ceará Water and Sewage Company (CAGECE). The best accuracy was achieved with two sub-basins, showing results above 75% for R equal to 0.01. For return periods of 2, 5, and 10 years, the R value of 0.01 maintained the best performance, despite significant increases in water volume. As a network improvement measure, both structural and non-structural solutions are recommended. The model proved adequate for Fortaleza's reality and can be used as a practical tool for forecasting sewer system overflows. The proposed methodology may also be applicable to other cities with similar characteristics.

Keywords: Hydrological-hydraulic modeling. RTK. RDII. PCSWMM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes da rede de esgoto	27
Figura 2 – Componentes da vazão de esgoto em eventos de chuva	29
Figura 3 – Hidrograma unitário	31
Figura 4 – Representação de um hidrograma real	32
Figura 5 – Procedimento metodológico da pesquisa	36
Figura 6 – Localização da cidade de Fortaleza	37
Figura 7 – Localização da bacia da Vertente Marítima de Fortaleza-CE	38
Figura 8 – Rede de Esgoto Sanitária de Fortaleza	39
Figura 9 – Localização do Emil, Tereza Hinko. PV 15 e PV 41	41
Figura 10 – Intensidade, Duração e Frequência para estação pluviométrica do Pici elaborada com a equação de (SILVA <i>et al.</i> , 2013)	42
Figura 11 – Curva IDF gerado pelo PCSWMM para a estação pluviométrica do Pici	42
Figura 12 – Curva IDF gerado pelo PCSWMM para a estação pluviométrica do Edson Queiroz	43
Figura 13 – Inserindo parâmetros do RTK no PCSWMM	44
Figura 14 – Hidrograma unitário triangular	45
Figura 15 – Série histórica da estação Edson Queiroz	47
Figura 16 – Cenários de simulação	49
Figura 17 – Boxplot de extravasão do Emil e Tereza Hinko	51
Figura 18 – Precipitação dos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2023 na bacia Vertente Marítima, em Fortaleza, Ceará	52
Figura 19 – Séries temporais de nível e precipitação, destacando o limite de extravasão	53
Figura 20 – Perfil longitudinal do Interceptor Leste na bacia Vertente Marítima, em Fortaleza, Ceará	54
Figura 21 – Simulação dos melhores cenários de R para diferentes sub-bacias	55
Figura 22 – Simulação do R para Jan/Fev/Mar de 2023	56
Figura 23 – Perfil longitudinal do Interceptor Leste detalhando a extravasão nos PVs 15 e 41	57
Figura 24 – Precipitação do dia 18 de Janeiro de 2023	57
Figura 25 – Tempo de retorno para 2, 5 e 10 anos com R=0,01	58
Figura 26 – Simulação para diferentes valores de R	60
Figura 27 – Cenários de simulação de R para 2 sub-bacias	69

Figura 28 – Cenários de simulação de R para 4 sub-bacias	69
Figura 29 – Cenários de simulação de R para 8 sub-bacias	70
Figura 30 – Cenários de simulação de R para 10 sub-bacias	70
Figura 31 – Cenários de simulação de R para 25 sub-bacias	71
Figura 32 – Cenários de simulação de R para 35 sub-bacias	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos que usaram o método RTK	33
Tabela 2 – Dados da vazão das Estações Elevatórias do sistema de esgotamento sanitário.	40
Tabela 3 – Características das fórmulas do tempo de concentração	45
Tabela 4 – Dados estatísticos	51
Tabela 7 – Tubulação original	59
Tabela 8 – Proposta da nova tubulação	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Água e Saneamento Básico
BWF	<i>Base Wastewater Flow</i>
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
DWF	<i>Dry-Weather Flow</i>
EEE	Estações Elevatórias de Esgoto
EPC	Estação de Pré-condicionamento de Esgoto
ETE	Estações de Tratamento de Esgotos
FUNCAP	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GW	<i>Groundwater Infiltration</i>
HU	Hidrograma Unitário
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IL	Interceptor Leste
IO	Interceptor Oeste
LRH	Laboratório de Recursos Hídricos
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PCSWMM	<i>Personal Computer Storm Water Management Model</i>
PF2	Praia do Futuro 2
PIB	Produto Interno Bruto
PPP	Parceria Público-Privada
PVs	Poços de Visita
RDII	<i>Rainfall Derived Infiltration and Inflow</i>
RTK	<i>Rainfall-to-Kinematic Flow</i>
SBN	Soluções Baseadas na Natureza
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SEUMA	Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente de Fortaleza

SIG	Sistema de Informação Geográfica
SR	Secretarias Regionais
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
Tr	Período de Retorno
UFC	Universidade Federal do Ceará
USDA	<i>U.S. Department Of Agriculture</i>
USEPA	<i>U.S Environmental Protection Agency</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivos	19
1.3	Objetivo Geral	19
1.4	Objetivos Específico	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Aspectos hidrológicos	21
2.2	Precipitação Máxima	21
2.3	Hidrograma unitário	22
2.4	Sistema de drenagem de águas pluviais	22
2.5	Urbanização e impermeabilização do solo	23
2.6	Sistema de esgotamento sanitário	24
2.6.1	<i>Tipologia do sistema de esgotamento sanitário</i>	25
2.6.2	<i>Componentes do sistema de esgoto sanitário</i>	26
2.7	Deposição de sedimentos em rede de esgoto	27
2.8	Infiltração de águas pluviais	28
2.9	<i>Rainfall Derived Infiltration and Inflow (RDII)</i>	30
2.10	Modelagem computacional	34
2.10.1	<i>Storm Water Management Model (SWMM)</i>	35
2.10.2	<i>Personal Computer Storm Water Management Model (PCSWMM)</i>	35
3	METODOLOGIA	36
3.1	Área de estudo	37
3.1.1	<i>Fortaleza</i>	37
3.1.2	<i>Bacia da Vertente Marítima</i>	38
3.2	Modelagem Hidrológica-Hidráulica	39
3.2.1	<i>Macro-sistema da Rede de Esgoto</i>	39
3.2.2	<i>Dados pluviométricos</i>	40
3.3	Parâmetros RTK	43
3.3.1	<i>Propagação superficial</i>	44
3.4	Análise temporal da estação pluviométrica do Edson Queiroz	47

3.5	Cenários	47
3.5.1	<i>Calibração do modelo</i>	48
3.5.2	<i>Validação do modelo</i>	49
3.6	Software de simulação	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	Análise temporal de extravasamento	51
4.2	Simulação PCSWMM	52
4.2.1	<i>Calibração do modelo</i>	54
4.2.2	<i>Validação do modelo</i>	55
4.2.3	<i>Simulação com Tempo de Retorno</i>	56
4.2.4	<i>Discussão sobre possíveis soluções</i>	57
5	CONCLUSÕES	61
5.1	Recomendações	62
	REFERÊNCIAS	63
	ANEXOS	68
	ANEXO A – Simulação de Cenários de R para diferentes sub-bacias	69

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país está intimamente ligado à amplitude e à qualidade da infraestrutura dos serviços de água, esgoto, drenagem e gestão de resíduos sólidos (PINHEIRO *et al.*, 2016). No Brasil, o saneamento básico é estabelecido pela Lei 14.026, de 15 de julho de 2020, como um conjunto integrado de serviços, infraestrutura e operações que englobam abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo de águas pluviais. Esta legislação atualiza o marco regulatório do saneamento básico e atribui novas responsabilidades à Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA) (BRASIL, 2020).

O Nordeste brasileiro, que abriga a segunda maior população do país com mais de 54,6 milhões de habitantes, conforme dados do IBGE (2022a), tem acompanhado o processo de urbanização nacional, intensificado desde o século XX. Entre 2010 e hoje, a região apresentou uma taxa geométrica de crescimento anual de 0,52%, a menor da série histórica (FUSCO; OJIMA, 2023). Diferente do Sudeste, onde a industrialização impulsionou o crescimento urbano, o Nordeste viu sua urbanização acelerada por secas e a ausência de políticas públicas eficazes para mitigar esses desafios climáticos, resultando em um êxodo rural significativo. De acordo com Vergolino e Dantas (2005), a urbanização no Nordeste foi impulsionada por fatores que forçaram a população a deixar as áreas rurais, além da atração exercida pelas cidades.

O clima semiárido característico do Nordeste é marcado por altas taxas de evapotranspiração, solos pouco profundos com baixa capacidade de armazenamento de água e chuvas concentradas em curtos períodos do ano. Essa combinação de fatores, aliada às condições dos oceanos Atlântico e Pacífico, resulta em uma alternância entre anos de seca e cheias, conforme a variabilidade das chuvas na região (ANA, 2012).

No contexto nordestino, o estado do Ceará se destaca por ter a terceira maior população da região, estimada em 8.794.957 habitantes. Grande parte dos municípios cearenses está inserida em um clima semiárido, abrangendo 86,8% da área do estado. Este clima é caracterizado pela escassez de recursos hídricos e pela fragilidade dos recursos naturais, com uma grande diversidade tanto geográfica quanto climática. A variabilidade espacial e temporal do regime de chuvas se manifesta tanto na distribuição ao longo da estação chuvosa quanto no total anual de precipitação em anos consecutivos na mesma localidade (IBGE, 2022b).

A região metropolitana de Fortaleza, situada ao norte do Ceará, tem passado por uma rápida expansão urbana nos últimos anos, resultando em mudanças significativas no uso e

ocupação do solo e provocando um processo de degradação ambiental. A ocupação irregular ao longo das redes de drenagem, especialmente nas margens de rios e mananciais que cortam a área urbana, tem se tornado mais frequente (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2015a). Fortaleza, que possui o 11º maior Produto Interno Bruto (PIB) municipal do Brasil e o maior da Região Nordeste, é um importante centro industrial e comercial do país (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2022).

Essa expansão urbana acelerada, aliada à desvalorização das infraestruturas de drenagem, tem gerado diversos problemas para os sistemas de drenagem urbana da cidade, como inundações, poluição de águas superficiais e subterrâneas, e sobrecarga dos sistemas de esgoto. Além disso, os custos de transporte e tratamento dos efluentes urbanos têm aumentado, devido à quantidade e à qualidade dos mesmos (MATOS, 2006; MEDEIROS; DORNELLES, 2022).

Embora o desgaste natural dos sistemas de coleta seja inevitável, o uso inadequado dessas redes pode agravar a situação, reduzindo sua eficiência e causando extravasamento de esgoto em pontos críticos. Esse tipo de problema tem um impacto significativo tanto na população quanto no meio ambiente, aumentando os riscos de contaminação e criando condições insalubres (SABOIA, 2022).

A infiltração de águas pluviais nos sistemas de esgoto sanitário é o processo pelo qual a água penetra no solo ou em estruturas, geralmente devido à pressão hidrostática ou à gravidade. Afluências indevidas, referem-se à entrada de água em uma construção que não deveria ocorrer, muitas vezes causada por falhas no sistema de drenagem ou pelo mau projeto de impermeabilização. Isso inclui águas que entram devido a fissuras, junções inadequadas ou falta de manutenção de sistemas de drenagem, tornando-se um dos maiores desafios para a operação eficiente desses sistemas. Para enfrentar esse problema, as autoridades competentes têm se empenhado na adoção de estratégias e métodos de gestão que possam minimizar os impactos causados por essas afluências (FERREIRA, 2014).

No planejamento e dimensionamento de sistemas de esgoto sanitário, é essencial que a carga de efluentes seja estimada levando em consideração tanto o consumo de água pela população quanto a entrada de águas parasitárias nas redes coletoras, que são aquelas que não fazem parte do sistema de drenagem e que afetam negativamente o desempenho das estruturas. Elas podem incluir água da chuva que entra em áreas não projetadas para drenagem, água que se acumula devido a falhas no sistema de esgoto, ou água subterrânea que invade espaços confinados. Caso o impacto dessas infiltrações pluviais não seja adequadamente considerado durante o projeto, o sistema pode ser sobrecarregado, o que comprometerá sua capacidade

de funcionamento (ABNT, 1986; ABNT, 2000). A situação é ainda mais crítica devido à ausência de indicadores precisos para avaliar a contribuição dessas águas pluviais nos sistemas de esgotamento sanitário (FESTI, 2005).

No Brasil, os sistemas de coleta de esgoto são projetados como sistemas separadores absolutos, onde as águas residuárias são coletadas separadamente das águas pluviais. Como resultado, estudos anteriores utilizando o *Storm Water Management Model* (SWMM) têm se concentrado apenas na simulação dos sistemas de drenagem urbana, sem considerar a influência dos sistemas de esgotamento sanitário (VINAGRE *et al.*, 2015; FORMIGA *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017; PEREIRA *et al.*, 2021; MESQUITA; NETO, 2022).

Outros estudos se dedicaram à modelagem e avaliação do impacto da drenagem no macrossistema de esgoto, incluindo Interceptor Leste (IL), Interceptor Oeste (IO) e coletores tronco. Esses estudos focaram nas interferências indevidas de águas pluviais e no aporte de sedimentos, analisando a concentração de parâmetros de qualidade da água no sistema de drenagem, incluindo indicadores microbiológicos (MESQUITA, 2018; PEREIRA *et al.*, 2021; ANCHIETA, 2022; SABOIA, 2022; ARAÚJO, 2023).

No entanto, não foram realizadas simulações hidrológicas ou hidráulicas ao longo do IL para identificar e verificar o parâmetro ideal de infiltração de água pluvial, seja por drenagem ou por lençol freático. Isso destaca a originalidade e a relevância deste trabalho, além de reforçar a necessidade de mais pesquisas que forneçam ferramentas objetivas para a tomada de decisões na gestão ambiental e dos recursos hídricos em áreas urbanas. Esse tema ganha ainda mais importância no contexto da Lei Federal 11.445/07, que prevê uma análise integrada dos diferentes componentes do saneamento básico, incluindo os sistemas de esgotamento sanitário e a drenagem e manejo de águas pluviais urbanas.

Para universalizar o esgotamento sanitário, foi realizada a Parceria Público-Privada (PPP) firmada entre a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) e a Ambiental Ceará. A empresa é responsável pela ampliação, operação e manutenção do sistema de esgotamento sanitário em 24 municípios das regiões metropolitanas de Fortaleza e do Cariri, atendendo 4,3 milhões de cearenses. Ao todo, R\$ 6,2 bilhões serão investidos em obras, levando esgotamento sanitário para 90% da população até o ano de 2033, e avançando para 95% em 2040 (CAGECE, 2024).

1.1 Justificativa

Este estudo aborda a importância da modelagem hidráulica na análise de redes de esgotamento sanitário, destacando sua capacidade de simular diferentes condições operacionais com base em dados como características da rede, informações operacionais e vazões (ARASHIRO, 2017). A modelagem hidráulica otimiza a análise dessas redes, permitindo a avaliação de sistemas tanto em fase de implantação quanto já existentes.

O controle eficaz da entrada de águas pluviais requer compreensão do funcionamento do sistema e utilização de metodologias para avaliar e prever vazões e volumes infiltrados. Nesse contexto, a modelagem matemática de sistemas de esgoto e drenagem urbana desempenha papel crucial na busca por soluções para o planejamento, gestão e reabilitação desses sistemas. Entretanto, a qualidade dos modelos depende da disponibilidade de dados detalhados (MUTTI, 2015).

Este estudo utilizou modelagem hidráulica e hidrológica para identificar pontos críticos de entrada suscetíveis a falhas e extravasamento em um trecho do IL, em Fortaleza, Ceará, visando propor melhorias no sistema de esgotamento sanitário local.

Assim, essa pesquisa contribui para identificar as interações entre os sistemas de drenagem e esgoto em áreas urbanas densamente povoadas, servindo como base para futuros estudos e para o desenvolvimento de políticas públicas direcionadas à mitigação de danos causados por inundações e extravasamentos.

1.2 Objetivos

1.3 Objetivo Geral

Propor uma metodologia para simulação e otimização de redes coletoras de esgoto submetidas a contribuições pluviais e de lençol freático em ambientes urbanizados.

1.4 Objetivos Específico

- Calibrar e validar a modelagem hidrológica-hidráulica do IL;
- Aplicar a metodologia *Rainfall Derived Infiltration and Inflow* (RDII) para estimar o volume de água parasitária que infiltra de forma indevida no sistema;
- Identificar pontos críticos de extravasamento e sobrecarga do interceptor;

- Verificar e validar a condição do melhor cenário usando os parâmetros *Rainfall-to-Kinematic Flow* (RTK);
- Propor e aplicar a equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para diferentes períodos de retorno;
- Avaliar o impacto da infiltração para diferentes condições de operação;
- Propor soluções técnicas para a melhoria das condições operacionais do IL.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aspectos hidrológicos

A água, sujeita a variações naturais e regida por princípios físicos, altera seu estado conforme as condições ambientais. Essa flexibilidade torna a água um elemento essencial para a estabilidade global, participando ativamente do ciclo hidrológico (BUTLER *et al.*, 2018; PINTO *et al.*, 1976).

Na atmosfera, a água existe como vapor ou em forma de gotículas. Quando precipita, atinge a superfície terrestre, onde uma parte é absorvida pela vegetação e retorna à atmosfera, um processo denominado interceptação. Ao atingir o solo, a água começa a se infiltrar; se o solo estiver saturado, o escoamento superficial ocorre, direcionando a água para áreas mais baixas. A evaporação, impulsionada pela energia solar, faz com que a água suba de volta para a atmosfera, completando o ciclo (PINTO *et al.*, 1976).

No ambiente urbano, o ciclo da água é impactado pela urbanização, que intensifica o escoamento superficial e o risco de inundações devido à presença de superfícies impermeáveis e semipermeáveis. Além disso, o aquecimento global e as mudanças climáticas têm provocado chuvas extremas mais frequentes, o que pode sobrecarregar os sistemas de drenagem (BUTLER *et al.*, 2018).

2.2 Precipitação Máxima

A precipitação máxima pode ser descrita como um evento climático extremo, caracterizado por uma duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma região ou bacia hidrográfica específica (TUCCI, 2012). Devido à maior disponibilidade de dados de precipitação em comparação aos dados de vazão, o estudo das precipitações máximas é comumente utilizado para estimar a vazão de enchente de uma bacia, frequentemente representadas por curvas IDF.

Em projetos de obras hidráulicas, é fundamental compreender três aspectos essenciais: intensidade, duração e frequência das precipitações. A relação entre essas variáveis deve ser estabelecida a partir de observações de chuvas intensas ao longo de um período extenso e representativo (TUCCI, 2012). A intensidade e a duração são calculadas com base em registros pluviométricos, enquanto a frequência, ou tempo de retorno, refere-se ao intervalo médio de tempo (em anos) em que um determinado evento ocorre ou é superado em qualquer ano. Para

equações IDF, esses eventos se referem às precipitações máximas (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Com base nesses dados, outros parâmetros, como o escoamento superficial, também podem ser determinados para fins de estudo e análise.

2.3 Hidrograma unitário

Compreender os processos hidrológicos é fundamental para gerenciar eficientemente os recursos hídricos e planejar projetos de engenharia, como sistemas de drenagem urbana. O tempo que a água permanece nos diversos componentes da hidrosfera influencia a disponibilidade dos recursos e o risco de inundações (SANTOS *et al.*, 2023). Esse cenário tem impulsionado o interesse em investigações hidrológicas e na análise dos caminhos que a água percorre até chegar aos rios (MORAES *et al.*, 2003). Dentro desse contexto, o escoamento superficial emerge como uma etapa crucial, particularmente para projetos de engenharia, devido aos problemas associados, como inundações e transporte de resíduos que podem poluir os cursos d'água (CECÍLIO; PRUSKI, 2003).

Para estimar a vazão máxima resultante de eventos de chuva, são aplicados modelos que simplificam esses processos, destacando-se o conceito do Hidrograma Unitário (HU). Esse modelo busca representar o hidrograma de vazão gerado a partir de um hietograma de precipitação na saída de uma bacia hidrográfica (CAMPOS *et al.*, 2020).

O Hidrograma Unitário pode ser definido como uma função-resposta linear da bacia hidrográfica a uma chuva efetiva—considerando apenas o volume que gera escoamento superficial, sem contabilizar a infiltração—e unitária, geralmente utilizando-se volumes de chuva de 1 cm. Esse volume efetivo de chuva produz um gráfico onde a vazão é proporcional à precipitação durante um determinado período. A linearidade do modelo permite a geração do hidrograma total, que é o gráfico da vazão em função do tempo para um ponto específico durante um evento chuvoso (SILVEIRA, 2016).

2.4 Sistema de drenagem de águas pluviais

O aumento da população e a ocupação de áreas em regiões mais baixas, como várzeas e margens de rios e áreas costeiras, motivados pela proximidade com os corpos d'água, têm contribuído para diversos problemas relacionados a inundações em áreas urbanas. Além disso, a retificação dos cursos d'água naturais e o aterramento de córregos para a construção de vias e

edificações aceleram o escoamento superficial e o pico de vazão, intensificando a frequência das inundações (CANHOLI, 2015).

No Brasil, durante muitos anos, a solução de drenagem adotada seguiu uma abordagem predominantemente "higienista," cujo foco era apenas afastar rapidamente as águas pluviais das áreas urbanas (CHRISTOFIDIS *et al.*, 2020). Conforme destacado por Souza (2013), essa abordagem simplista se baseava em cálculos de vazão e no dimensionamento de condutos e galerias, sem integrar adequadamente o planejamento urbano com o desenvolvimento sustentável dos sistemas de drenagem.

Uma alternativa sustentável a essa prática são as técnicas compensatórias, que consistem em medidas de controle de escoamento realizadas na própria fonte de geração, com o objetivo de aumentar a retenção ou infiltração das águas pluviais (LUCAS *et al.*, 2015). De acordo com Borges (2018), essas técnicas podem ser classificadas como não estruturais e podem ser aplicadas de forma pontual, linear ou em bacias hidrográficas.

As medidas não estruturais englobam diversas ações que visam conservar e recuperar as características naturais de uma determinada região. Por outro lado, as medidas estruturais envolvem intervenções físicas por meio de obras de engenharia (MENDES, 2019). Para um controle eficaz das inundações, é essencial uma integração harmoniosa entre essas abordagens, garantindo à população a minimização de prejuízos e promovendo uma convivência sustentável com os rios (BARBOSA, 2006).

2.5 Urbanização e impermeabilização do solo

Em áreas naturais, o escoamento das águas pluviais é um processo lento, devido à presença de vegetação que atua como barreira. Parte dessa água se infiltra gradualmente no solo, percolando até atingir a zona saturada, onde contribui para a formação do lençol freático. Em contraste, em regiões urbanizadas, a infiltração é dificultada pela impermeabilização do solo, o que frequentemente resulta em enchentes (RODRIGUES *et al.*, 2020).

A ausência de planejamento urbano adequado e a falta de conscientização ambiental por parte dos gestores e da população agravam a impermeabilização do solo e promovem o desmatamento de vastas áreas. O desmatamento reduz o atrito entre a água da chuva e o solo, o que acelera o escoamento superficial durante períodos de chuva intensa. Isso resulta em maior volume de água nos rios, que, quando excedem sua capacidade de escoamento, acabam transbordando e invadindo áreas urbanas, prejudicando a qualidade de vida dos moradores

(SILVA *et al.*, 2020).

Além dos prejuízos econômicos e dos riscos à saúde provocados pelas enchentes, que são consequência da baixa infiltração do solo, outros problemas surgem, como a redução do nível do lençol freático, devido à falta de recarga, e a diminuição da evapotranspiração. Durante o processo de urbanização, também ocorre um aumento na produção de sedimentos, o que leva a uma maior poluição das águas pluviais (BORGES, 2018). Diante desse cenário, é essencial desenvolver estratégias que permitam uma melhor compreensão dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, visando reproduzir o comportamento do sistema de forma mais precisa (SHINMA, 2011).

2.6 Sistema de esgotamento sanitário

Desde as civilizações antigas até os dias atuais tem-se observado ações em prol da garantia da salubridade através de sistemas de abastecimento de água e de disposição de efluentes. Nesse contexto, quando considera-se a disposição final de efluentes, alguns acontecimentos históricos ganham destaque, como a Cloaca Máxima, que de acordo com Costa *et al.* (2012), foi construída pelos romanos no século VI a.C. e perdurou até a queda do Império Romano, sendo considerada um dos primeiros sistemas complexos de esgotamento sanitário.

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9.648/86, o esgoto sanitário é definido como "despejo líquido composto por esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e contribuição pluvial parasitária." Ele contém cerca de 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, além de microrganismos patogênicos ou não. A necessidade de tratamento decorre principalmente dessa pequena fração de sólidos, como destacado por Sperling (2005). Mesmo com avanços significativos nos últimos anos em saneamento básico, o Brasil ainda ocupa a 112ª posição no ranking de saneamento do Instituto Trata Brasil e o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS). Além disso, o Atlas Esgoto (2017), que reúne informações da ANA e da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, mostra que mesmo com uma geração de 9,1 toneladas de esgoto por dia no país, 45% da população ainda não possui tratamento de esgotos.

Como consequência desses baixos índices, o comprometimento da qualidade ambiental chega a ser inevitável, causando um meio propício para a propagação de doenças de veiculação hídrica e outras correlacionadas ao crescimento sem infraestrutura, tornando-se um problema de saúde pública. O IBGE (2011), através de dados da Organização das Nações Unidas

(ONU), mostra que a falta de saneamento é responsável por 0,9% das mortes no país em uma década, sendo as regiões Centro-Oeste (42,9%) e Nordeste (27,1%) as que registraram os maiores percentuais. As principais causas de morte, foram Doença de Chagas, diarreia e disenteria, que corresponderam a quase 81,5% dos óbitos no período de 2008 a 2019.

Dada a importância crucial do tratamento e descarte apropriado de esgoto sanitário, é fundamental entender sua composição. Essa composição inclui resíduos domésticos, efluentes industriais, água subterrânea infiltrada (SPERLING, 2005) e contribuições parasitárias (NUVOLARI, 2021).

Considerando a composição supracitada, as vazões parasitárias e as infiltrações são tidas como indevidas para as redes de esgoto, podendo ser originadas no subsolo ou de encaminhamentos acidentais ou clandestinos de águas pluviais. As infiltrações, por exemplo, comumente ocorrem de água que penetra pela junta dos canos, através de imperfeições dos dutos, poços de visita, etc (NUVOLARI, 2021).

De acordo com a NBR 9.648/86 da ABNT, o Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) é tido como um “conjunto de condutos, instalações e equipamentos destinados a coletar, transportar, condicionar e encaminhar, somente esgoto sanitário, a uma disposição final conveniente, de modo contínuo e higienicamente seguro”.

Para Nuvolari (2021), as principais finalidades de se implantar um SES são relacionadas com aspectos higiênicos, sociais e econômicos. Primeiramente do ponto de vista higiênico tem-se a prevenção e o controle de doenças de veiculação hídrica responsáveis por agravos na saúde pública, trazendo à tona a necessidade de promover o tratamento e a disposição adequada do efluente. Do ponto de vista social, o objetivo consiste em melhorar a qualidade de vida da população e do ponto de vista econômico o objetivo está relacionado com o aumento da produtividade em geral, principalmente das indústrias e agropastoris.

2.6.1 Tipologia do sistema de esgotamento sanitário

De acordo com Tsutiya e Sobrinho (1999), os sistemas de esgotamento sanitário podem ser do tipo unitário, separador parcial e separador absoluto, que significam respectivamente, águas pluviais, residuárias e de infiltração são coletadas pelo mesmo sistema; águas pluviais são destinadas parcialmente com as águas residuárias e de infiltração; e águas pluviais são encaminhadas para um sistema de drenagem, enquanto que as águas residuárias e de infiltração são coletadas por um SES. Sperling (2005) complementa que no Brasil é utilizado o sistema

separador, o qual trabalha com a drenagem e o esgoto sanitário em sistemas isolados, sendo assim, as águas pluviais não devem chegar até às Estações de Tratamento de Esgotos (ETE).

Na prática, o sistema separador absoluto nem sempre funciona da forma planejada diante de infiltrações de águas da chuva no SES ou por ligações clandestinas (MUTTI, 2015). Em áreas altamente urbanizadas onde a drenagem natural das águas pluviais é prejudicada pela impermeabilização do solo, é comum o cenário de extravasamentos na rede esgoto (FERNANDES, 2017).

2.6.2 Componentes do sistema de esgoto sanitário

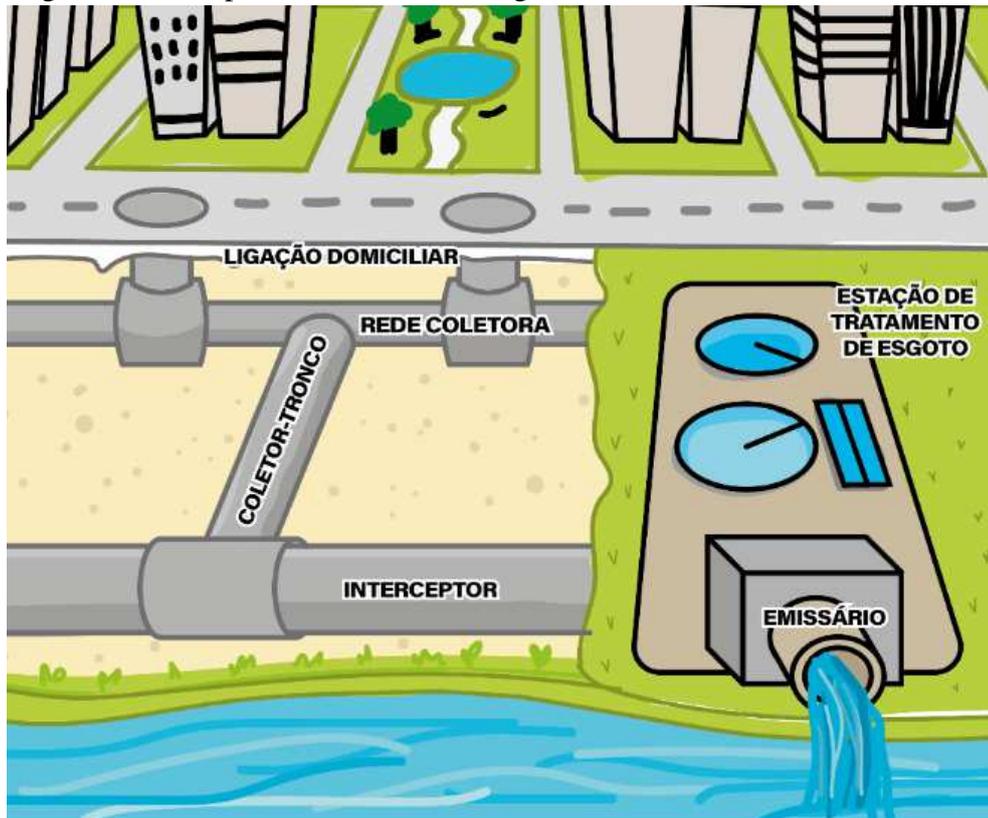
Um SES que funcione de forma plena, atendendo a todos requisitos legais e sem comprometer a qualidade do meio ambiente deve ser composto de diversas partes. Segundo Nuvolari (2021), a rede coletora dispõe de ligações prediais, coletores tronco e órgãos acessórios, que permitem o recebimento das contribuições domiciliares, levando o esgoto sanitário coletado para os grandes condutos de transporte que direcionam para o local de tratamento e descarga final.

Tsutiya e Sobrinho (1999) revelam que essa mesma rede é constituída por:

- **Ligações domiciliares:** são as instalações feitas pelos próprios moradores que se encaminham para a rede coletora;
- **Rede coletora:** recebe e encaminha os esgotos das residências para os próximos coletores;
- **Coletor tronco:** recebe a contribuição de outros coletores e direciona um interceptor ou emissário;
- **Interceptor:** permitem o recebimento de coletores ao longo do seu comprimento e não permite que sejam feitas ligações prediais direta;
- **Emissário:** responsável por conduzir o esgoto sanitário a um destino final adequado;
- **Estação elevatória:** permitem a transferência do esgoto de uma cota mais baixa para uma cota mais alta;
- **Estação de tratamento:** são instalações destinadas a realizar o tratamento do esgoto antes de sua destinação final;
- **Acessórios:** consistem em tubos de inspeção e tubos de inspeção e limpeza, terminais de limpeza, sifão invertido, poços de visitas e caixas de passagem.

Na Figura 1 é possível observar a disposição dos componentes supracitados:

Figura 1 – Componentes da rede de esgoto



Fonte: (SABOIA, 2022).

2.7 Deposição de sedimentos em rede de esgoto

Há uma escassez de trabalhos na literatura que tratam do assunto de deposição de sedimentos em redes de esgoto sanitário. Normalmente o foco é apenas a influência para a drenagem urbana ou substâncias que geram corrosão e demais problemas. Mays (2010) relata que os sedimentos são fragmentos da rocha-mãe, sendo o material rochoso o principal componente dos sedimentos. O autor complementa que efeitos das chuvas podem gerar a erosão dessas partículas, sendo carregadas para rede de drenagem (MESQUITA, 2018; PEREIRA *et al.*, 2021; ANCHIETA, 2022; SABOIA, 2022; ARAÚJO, 2023).

A ABNT NBR 9649 de 1986, não prevê influência do grande acúmulo de sedimentos na tubulação, mas designa que os condutos devem ter uma lâmina de efluente igual ou inferior a 75% do diâmetro da tubulação. Para casos em que a velocidade final for maior que a velocidade crítica, o valor a ser ocupado pelo efluente é de apenas 50% da tubulação destinada para ventilação.

Na norma para projeto de interceptores NBR 12.207/92, aponta-se que a tensão trativa média deve ser 1,5 Pa e declividade suficiente para que haja o arraste de sedimentos

na tubulação, evitando que haja acúmulo nos trechos. Essa norma trata da contribuição das infiltrações de águas pluviais e casos em que deve ser dimensionado um extravasor.

A CAGECE realiza limpezas regularmente nos interceptores para retirar os materiais sedimentados nas tubulações a fim de evitar obstruções, sobrecarga e extravasões que prejudicam o funcionamento da rede de esgoto.

2.8 Infiltração de águas pluviais

A infiltração de águas pluviais nos sistemas de esgoto é um problema que, muitas vezes, não pode ser completamente evitado, resultando em sobrecargas quando as vazões ultrapassam os valores previstos. Essa contribuição indevida pode ocorrer tanto por meio de ligações clandestinas quanto pela deterioração dos condutos, que facilita a entrada não autorizada de água. A sobrecarga geralmente atinge seu pico durante eventos de chuvas intensas (FESTI, 2006).

Eddy e Tchobanoglous (1985) definem essa contribuição em três tipos que estão listados a seguir:

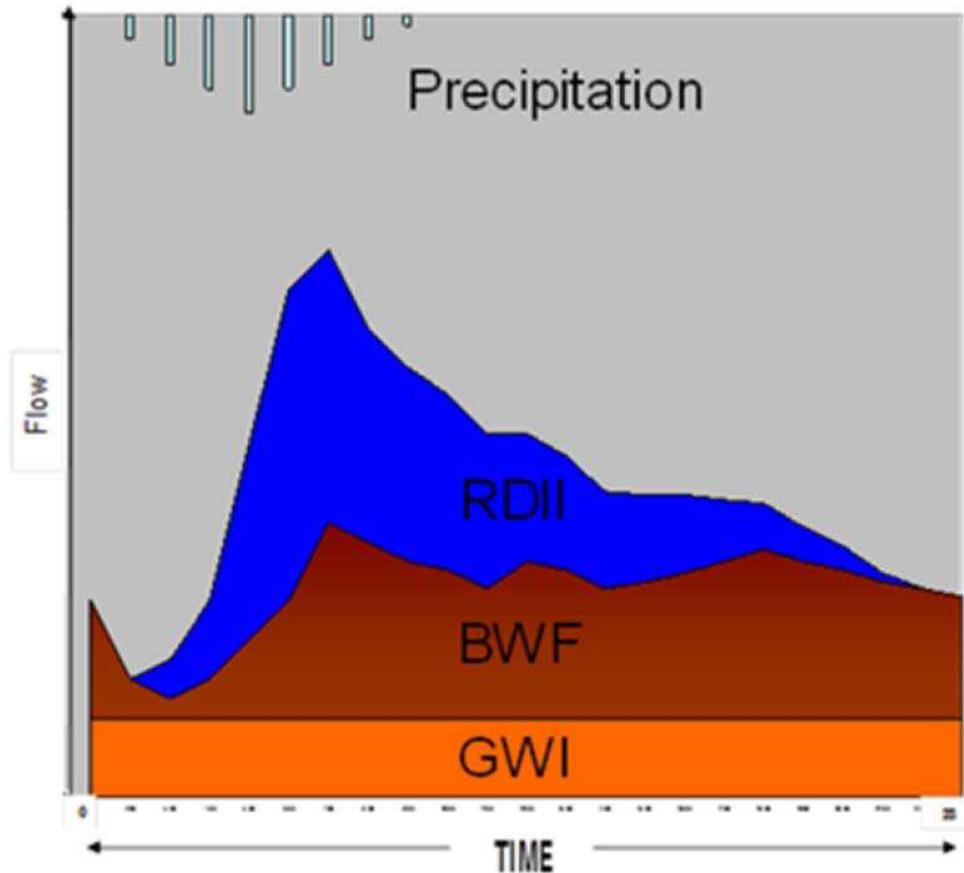
- Infiltração: águas pluviais que entra na rede coletora através das conexões, trincas nos tubos, juntas e poços de visitas com falhas estruturais;
- Afluxo Direto: contribuição de água devido a ligações de coletores de águas pluviais na rede de esgoto;
- Afluxo com atraso de tempo: água de chuva que demora alguns dias para atingir o sistema de coleta de esgotos.

Segundo a norma técnica ABNT NBR 9648/1989, o esgoto sanitário é definido como um "despejo líquido constituído por esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária". Isso significa que as águas de infiltração são consideradas parte integrante do esgoto sanitário. A mesma norma descreve a contribuição pluvial parasitária como a "porção de escoamento superficial inevitavelmente absorvida pela rede coletora de esgoto sanitário". Netto e Fernandez (1998) amplia essa definição, incluindo as águas de chuva coletadas em telhados e quintais, direcionadas para o sistema de esgoto, além de lançamentos de águas provenientes de lavagens de postos de gasolina, descargas de piscinas, entre outros. Independentemente do tipo de sistema de esgoto, as águas pluviais devem ser consideradas parte integrante do esgoto sanitário, conforme estabelecido pela NBR 9648/1989.

Durante eventos de chuva, a vazão de esgoto pode ser composta por três componentes

distintos, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Componentes da vazão de esgoto em eventos de chuva



Fonte: (WEF, 2019).

A *Base Wastewater Flow* (BWF), ou vazão base do esgoto, refere-se ao fluxo contínuo de esgoto residencial, comercial ou industrial descarregado no sistema de esgoto sanitário. Este fluxo varia ao longo do dia, geralmente com picos durante a manhã e no início da noite, e diminui durante a madrugada e as primeiras horas da manhã. Há também variações significativas entre dias úteis, finais de semana e feriados. A BWF está sempre presente nos sistemas de esgoto, independentemente de condições meteorológicas.

A *Groundwater Infiltration* (GWI), ou vazão de infiltração de água subterrânea, representa o fluxo de água proveniente de aquíferos que penetra no sistema de coleta através de tubos com vazamentos, juntas mal seladas e paredes de bueiros, tanto em condições de tempo seco quanto chuvoso. Esta vazão varia ao longo do ano, dependendo dos níveis de água subterrânea e da umidade do solo. Em regiões com volumes constantes de água subterrânea ao longo do ano, o GWI e a BWF são frequentemente combinados como fluxo de tempo seco (*Dry-Weather Flow* (DWF)).

Por fim, o RDII, ou infiltração e afluência derivadas de chuvas, é o componente de resposta às precipitações que penetra nos sistemas de esgoto sanitário (SES) através de infiltração e afluxo. Este fluxo ocorre exclusivamente durante eventos chuvosos e pode persistir por dias, dependendo das características das chuvas. Este será o foco do estudo apresentado a seguir.

2.9 *Rainfall Derived Infiltration and Inflow (RDII)*

O RDII refere-se à fração de escoamento que ingressa no sistema de coleta sanitária durante e após um evento chuvoso. O volume e a forma do hidrograma do RDII são influenciados por fatores tanto externos quanto internos ao sistema. Fatores externos incluem elementos que diminuem e retardam a entrada de água no sistema, como vegetação, lagoas de superfície, evaporação e infiltração. Já os fatores internos estão ligados às condições físicas do próprio sistema de coleta. Em um sistema ideal, sem defeitos como rachaduras, juntas desalinhadas ou tampas de bueiros perfuradas, o RDII não deveria ocorrer. Contudo, na prática, os sistemas quase sempre apresentam esses problemas, frequentemente agravados pela idade dos componentes. Portanto, o volume do RDII é diretamente influenciado pela quantidade e extensão desses defeitos (GHEITH, 2011).

Diversos métodos são utilizados para estimar a vazão do RDII, mas, conforme Bennett (1999), não há um método que possa ser universalmente aplicado, devido à variedade de condições e aplicações dos sistemas. Esses métodos são classificados em sete categorias principais (FERREIRA, 2014):

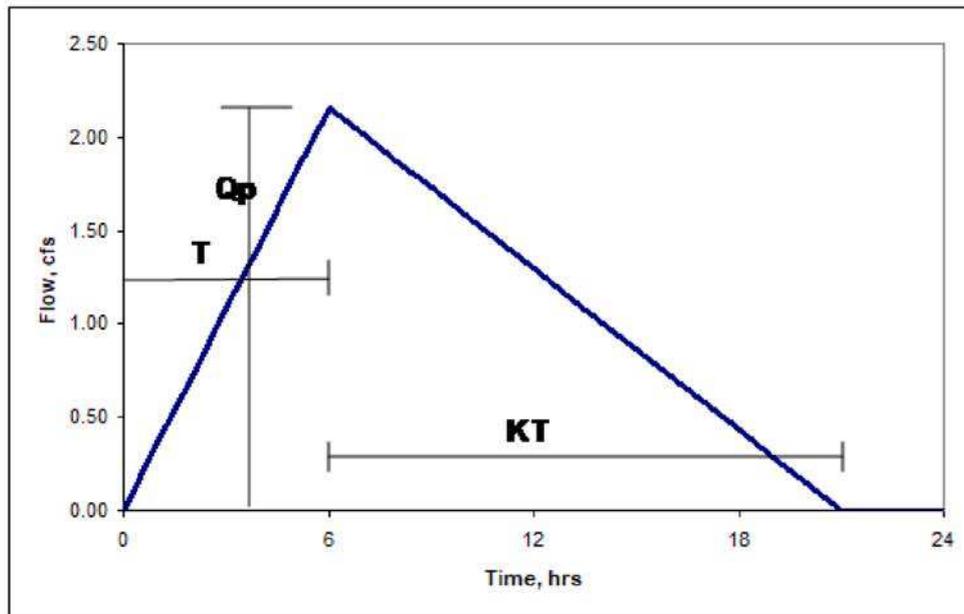
- Método das relações características (*Constant unit rate*);
- Método das percentagens de volume precipitado (*R-value*);
- Método de escoamento em linhas de água (*Percentage of stream flow*);
- Método do hidrograma unitário (*Synthetic unit hydrograph*);
- Método probabilístico (*Probabilistic method*);
- Método da correlação com dados de precipitação/caudal em linhas de água (*Predictive equation based on synthetic rainfall/flow regression*);
- Método da extrapolação com base em modelos de simulação hidrológica (*Predictive equation based on synthetic stream flow and basin characteristics*).

Segundo Ferreira (2014), o método do hidrograma unitário destaca-se por sua ampla aplicação e bons resultados na quantificação e avaliação do RDII. Este é um método empírico, no qual os parâmetros são calibrados com base em dados de precipitação e vazão observada.

Dentro dessa categoria, a metodologia RTK é especialmente notável, pois utiliza três hidrogramas triangulares para representar as diferentes formas com que a precipitação contribui para o RDII.

Esse hidrograma unitário busca simplificar o hidrograma do fluxo de esgoto em eventos de chuva, aproximando-o de uma forma triangular, conforme ilustrado na Figura 3 (WALSK, 2021).

Figura 3 – Hidrograma unitário



Fonte: (WALSK, 2021).

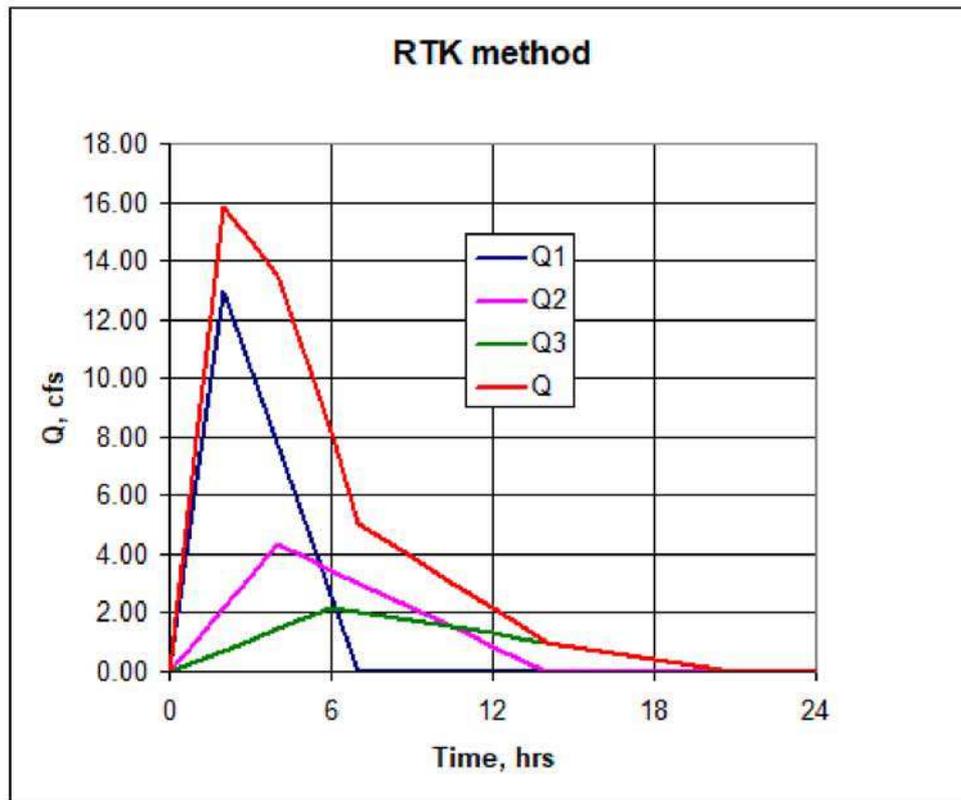
Ele é caracterizado por três parâmetros de calibração que dão nome ao método (R, T e K), definidos da seguinte maneira por Ferreira (2014):

- R: Representa a relação do volume que entra no SES como RDII com o volume total da precipitação;
- T: Representa o tempo de ascensão;
- K: Representa a relação entre o tempo de declínio e o tempo de ascensão.

Na prática, hidrogramas reais raramente apresentam a forma de triângulos perfeitos. A água da chuva pode entrar no sistema de esgoto em momentos diferentes após o evento chuvoso. Por isso, três hidrogramas triangulares distintos são utilizados para cada período, conforme mostrado na Figura 4 (WALSK, 2021).

O primeiro triângulo representa a resposta imediata à chuva, onde a água da precipitação entra diretamente no sistema por meio de ligações clandestinas e calhas conectadas indevidamente à rede de esgoto, resultando em um pico estreito e elevado, indicando um grande volume. O segundo triângulo representa uma resposta atrasada, com um pico médio e mais

Figura 4 – Representação de um hidrograma real



Fonte: (WALSK, 2021).

amplo. Por fim, o terceiro triângulo tem um período mais prolongado e um volume bem menor, refletindo o aumento do GWI, que com o tempo pode infiltrar-se no sistema sanitário através de juntas danificadas ou rachaduras nas tubulações (GHEITH, 2011). Softwares de modelagem utilizam essa metodologia para estimar o volume do RDII nos sistemas, embora não realizem os cálculos para determinar os parâmetros RTK de cada hidrograma, sendo necessário o uso de outros métodos para essa finalidade.

A Tabela 1, apresenta artigos que usam os parâmetros RTK no curto, médio e longo prazo, que auxiliaram no processo de calibração do modelo, podendo o R variar de 0,4% a 8%. Este trabalho faz a análise apenas do cenário a curto prazo. A análise mostra uma diversidade significativa nos valores de R, T e K entre os estudos, refletindo diferentes condições hidrológicas e abordagens metodológicas.

O estudo de Irvine *et al.* (2023), analisou a bacia hidrográfica localizada no centro de Singapura e tem uma área contribuinte de 100 km^2 que descarrega num reservatório à beira-mar. A captação inclui o centro da cidade, bem como áreas residenciais de alta e baixa densidade, áreas industriais e as premiadas áreas verdes do Parque Bishan-Ang Mo Kio e do Jardim Botânico de Singapura.

Tabela 1 – Trabalhos que usaram o método RTK

Artigos	Curto prazo			Médio prazo			Longo prazo		
	R	T	K	R	T	K	R	T	K
Irvine <i>et al.</i> (2023)	0,017	1,300	6,800	0,017	1,200	1,000	0,050	1,000	1,000
Manual Bentley StormCad (2024)	0,080	2,000	1,500	0,040	3,500	7,750	0,060	7,000	1,670
Kim <i>et al.</i> (2016)	0,004	0,117	0,658	0,004	0,414	2,487	0,003	11,797	0,187
CDM Smith (2016)	0,0075	1,000	1,500	0,015	3,5000	3,500	0,025	4,5000	6,000
Stantec (2021)	0,020	0,750	1,000	0,015	1,000	2,000	0,005	0,020	0,750
Sub-bacia S19	0,01	0,62	2,670	-	-	-	-	-	-
Sub-bacia S53	0,01	0,77	2,670	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Para o Manual Bentley StormCad (2024), os parâmetros RTK são uma propriedade de cada captação. Contudo, não é incomum que muitas bacias hidrográficas com características semelhantes compartilhem os mesmos parâmetros RTK.

No estudo de Kim *et al.* (2016), as previsões de RDII foram comparadas utilizando duas metodologias: o método baseado em RTK e métodos de regressão. Dados de monitoramento de longo prazo (de 1/1/2011 a 31/12/2011), que consistem em fluxo de água em intervalos de 10 minutos e a quantidade de precipitação, foram coletados na área de estudo doméstica (1,36 km² localizada no condado de H) e usados para a construção dos modelos de previsão de RDII.

No relatório de CDM Smith (2016), nos fornece orientações e procedimentos para estimar picos de vazão de 10 anos a partir de dados de medidores de vazão e precipitação de maneira consistente com as metodologias usadas e aplicadas no Modelo Hidráulico Regional e no Plano Regional de Gestão de Clima Úmido. A análise do RDII é realizada na SSOAP *Toolbox* para determinar as vazões em tempo seco e os parâmetros de hidrograma unitário triangular RTK que melhor representam os picos de vazão observados e as formas dos hidrogramas para eventos de vazão em tempo úmido observados.

Em Stantec (2021), aborda o uso do método RTK em 25 sub-bacias de 12,64 a 118,22 hectares para avaliar a capacidade de sistemas de esgoto durante eventos de chuva intensa, visando prevenir inundações em porções em áreas urbanas densamente povoadas como Toronto. A abordagem baseada em dados históricos e simulações de longo prazo proporciona uma ferramenta robusta para planejamento urbano e engenharia hidrológica. A análise é baseada em vazões de águas pluviais e dados de escoamento, empregando o modelo de triângulos RTK para prever picos de vazão.

2.10 Modelagem computacional

Com o aumento da complexidade dos sistemas modernos de drenagem urbana e a crescente preocupação com a gestão dos recursos hídricos, modelos matemáticos têm se tornado cada vez mais relevantes, especialmente para entidades gestoras de sistemas de saneamento. Esses modelos são ferramentas essenciais para a operação, planejamento e validação de projetos de drenagem (CÂNDIDO, 2013). Conforme Costa (2013), a modelagem matemática é uma técnica que permite simular condições reais e explorar possíveis alternativas, considerando uma faixa de incertezas.

Nos sistemas de drenagem urbana, os modelos de simulação buscam representar, de maneira simplificada, o comportamento de um sistema real em um programa computacional. Esses modelos permitem simular como o escoamento se comporta diante das diferentes infraestruturas, em várias etapas do ciclo de vida do sistema, seja durante o planejamento, a operação ou a reabilitação (CÂNDIDO, 2013). De acordo com Righetto (2009), o objetivo dos modelos de drenagem urbana é representar o escoamento das precipitações pela superfície, além de processos como interceptação, infiltração, evapotranspiração e a interação desses fenômenos com a rede de drenagem pluvial.

Os softwares de modelagem utilizados em sistemas de drenagem urbana geralmente combinam modelos hidráulicos e hidrológicos. Os modelos hidráulicos simulam o escoamento na rede de coletores, baseando-se em duas equações fundamentais da hidrodinâmica: a equação da continuidade e a equação dinâmica (CÂNDIDO, 2013). Já os modelos hidrológicos são empregados para entender e representar o comportamento das bacias hidrográficas, além de prever condições que diferem das observadas (TUCCI, 1998).

Ferramentas de geoprocessamento podem ser integradas aos modelos de drenagem urbana, facilitando a entrada de dados e permitindo a representação geométrica do sistema. Além disso, essas ferramentas podem incorporar funcionalidades de pós-processamento, auxiliando na criação de mapas e gráficos que tornam as variáveis utilizadas mais compreensíveis (CABRAL *et al.*, 2009). Existem diversos programas que realizam a modelagem hidráulica e hidrológica associados a essas ferramentas de geoprocessamento, cada um com suas próprias limitações. Alguns dos principais programas serão destacados nos itens seguintes.

2.10.1 Storm Water Management Model (SWMM)

O SWMM é um software criado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S Environmental Protection Agency* (USEPA)) para modelar e simular o escoamento superficial em áreas urbanas. Esse programa adota uma abordagem distribuída para calcular vazões, combinando a modelagem de microdrenagem e macrodrenagem, o que permite a simulação de inundações mesmo na ausência de dados históricos sobre transbordamentos de córregos e canais principais (CANHOLI, 2015; MESQUITA, 2018; MESQUITA; NETO, 2022; PEREIRA *et al.*, 2021).

O SWMM possibilita a simulação de processos hidrológicos e hidráulicos, aplicando modelos de chuva-vazão para eventos isolados ou contínuos. Isso permite a obtenção de dados detalhados sobre a qualidade e a quantidade das águas em escoamento através do sistema de galerias (GIRONÁS *et al.*, 2009).

2.10.2 Personal Computer Storm Water Management Model (PCSWMM)

Embora o SWMM ofereça várias vantagens e tenha diversas aplicações, ele não inclui uma interface espacial. Para preencher essa lacuna, foi criada em 1984 a versão comercial conhecida como *Personal Computer Storm Water Management Model* (PCSWMM). Este software combina um Sistema de Informação Geográfica (Sistema de Informação Geográfica (SIG)) com o SWMM, oferecendo um pacote abrangente e escalável para análises unidimensionais e bidimensionais de escoamento de águas pluviais (AKHTER; HEWA, 2016).

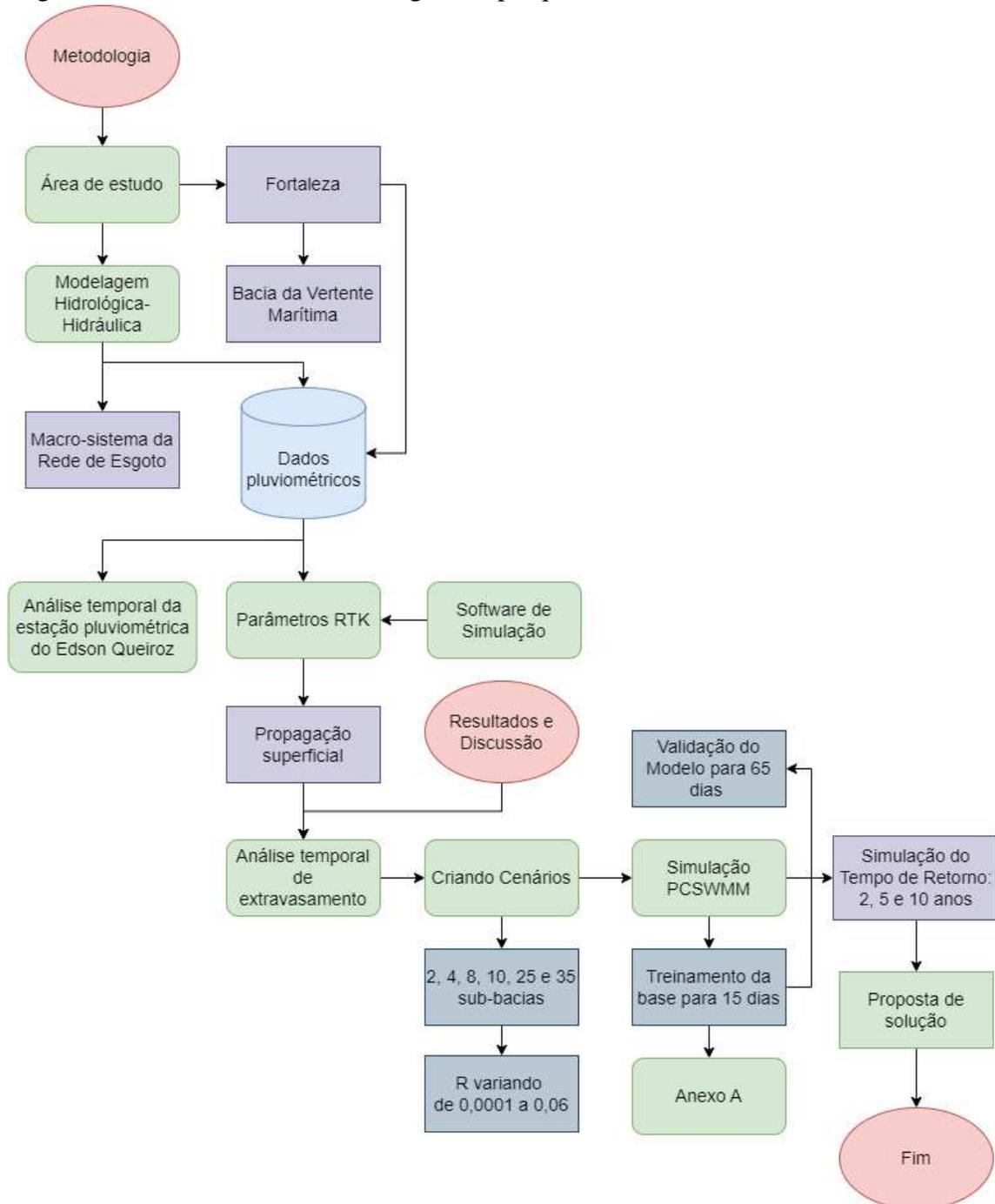
O PCSWMM é amplamente utilizado para o planejamento e análise de projetos envolvendo escoamento de águas pluviais, sistemas de esgoto, sistemas de drenagem urbanos e rurais (ROSSMAN *et al.*, 2010).

O estudo realizado por Stantec (2015) comparou diversos softwares para atender às necessidades hidráulicas de Waterloo, Ontário. Entre os softwares avaliados estavam PCSWMM, XPSWMM, MIKE URBAN, InfoWorks e SewerGEMS. O PCSWMM foi escolhido com base em vários critérios, incluindo sua capacidade de atender além das necessidades básicas, oferecer calibração superior, possuir ferramentas topológicas avançadas, proporcionar oportunidades de treinamento conveniente, oferecer excelente suporte técnico e ter uma estrutura de taxas mais econômica (MANUAL DO PCSWMM, 2024; ANCHIETA, 2022; SABOIA, 2022; ARAÚJO, 2023).

3 METODOLOGIA

O procedimento metodológico traçado para a execução dos objetivos do trabalho está resumido no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 – Procedimento metodológico da pesquisa



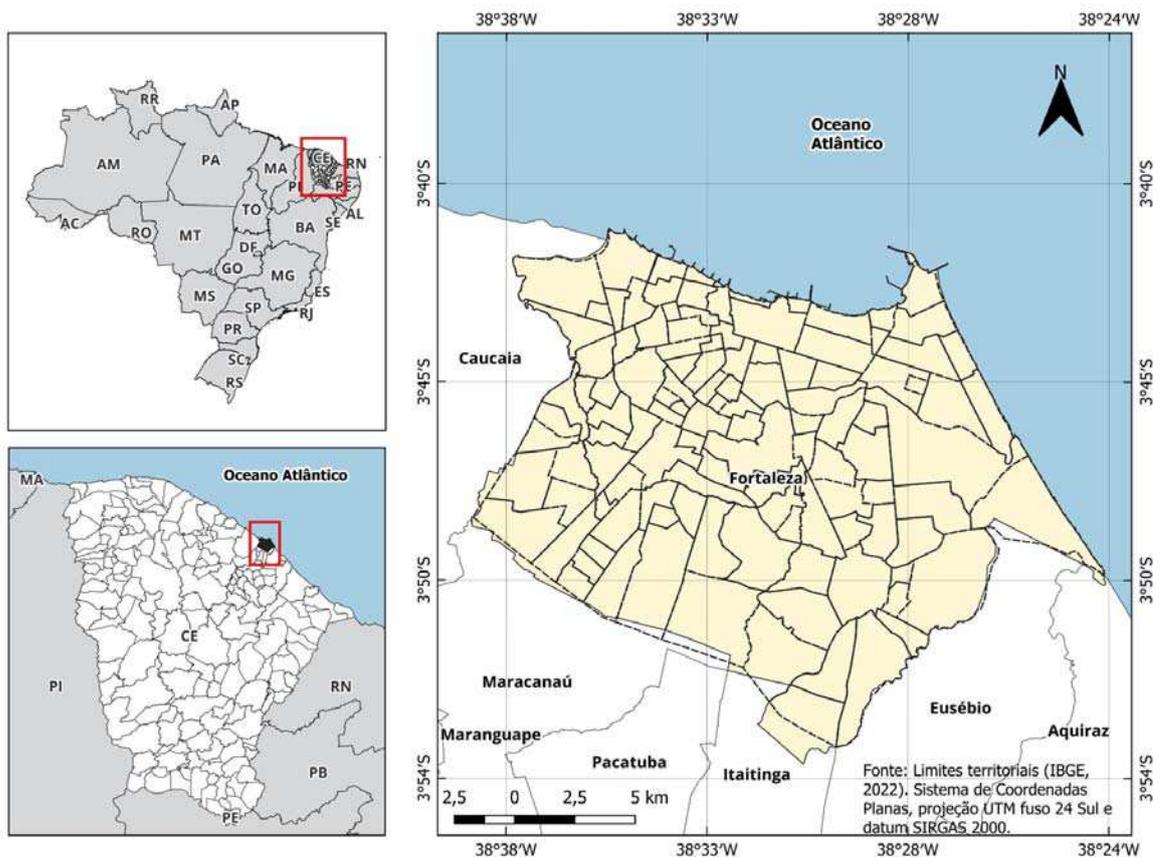
Fonte: elaborado pelo autor.

3.1 Área de estudo

3.1.1 Fortaleza

Fortaleza, capital do estado do Ceará, localiza-se nas coordenadas $3^{\circ}43'02''\text{S}$ $38^{\circ}32'35''\text{O}$ na região Nordeste do Brasil (IPECE, 2018) (Figura 6). É considerada uma cidade turística, possuindo 34km de litoral, banhada pelo oceano atlântico. Em termos populacionais, concentra a maior densidade demográfica do país, com mais de 7 mil habitantes por quilômetro quadrado. Os dados são do Censo Demográfico 2022, divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Geograficamente é subdividida em doze unidades territoriais de planejamento, denominadas Secretarias Regionais (SR), as quais são: SR1, SR2, SR3, SR4, SR5, SR6, SR7, SR8, SR9, SR10, SR11, SR12. Além das 12 áreas, a cidade é dividida em 39 territórios administrativos em 121 bairros (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2021).

Figura 6 – Localização da cidade de Fortaleza



Fonte: elaborado pelo autor.

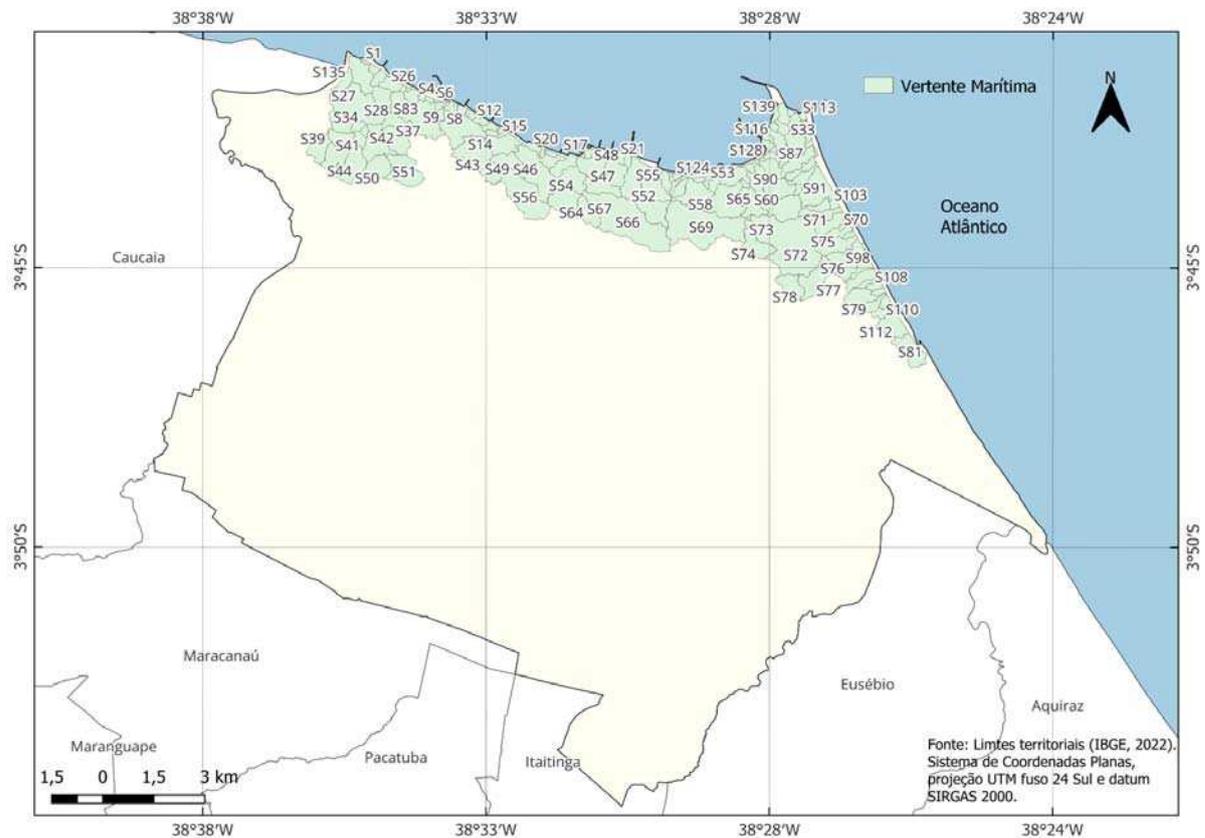
Possui precipitação média anual de 1584,0 mm, com período chuvoso de janeiro a maio e clima Tropical Quente Sub-úmido e evapotranspiração potencial média total anual de

1997,7mm (INMET, 2020). As principais bacias hidrográficas inseridas no município, total ou parcialmente, são: rio Cocó, Pacoti, Maranguapinho e Vertente Marítima (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2015b). Esta última, área de estudo desta pesquisa, será detalhada a seguir.

3.1.2 *Bacia da Vertente Marítima*

A bacia da Vertente Marítima (Figura 7) é a única bacia hidrográfica totalmente inserida no município de Fortaleza-CE, compreendendo a faixa de terra localizada entre a desembocadura dos Rios Cocó e Ceará, com topografia favorável ao escoamento das águas para o mar. Sua área de contribuição é de 34,54km² em 139 sub-bacias fazendo parte, total ou parcialmente de 26 bairros do município. Os principais recursos hídricos são os Riachos Jacarecanga, Pajeú, Maceió e a Lagoa do Papicu. Todos eles sofrem intensa influência do adensamento urbano, com soterramento e estreitamento de seus cursos e soluções de drenagem por vezes inadequadas e comprometedoras, por estarem em áreas ocupadas de alta densidade (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2015a).

Figura 7 – Localização da bacia da Vertente Marítima de Fortaleza-CE



Fonte: elaborado pelo autor.

A CAGECE disponibilizou a base cartográfica elaborada em conformidade com o convênio estabelecido entre a CAGECE e a Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente de Fortaleza (SEUMA), destinado a aprimorar a balneabilidade das praias de Fortaleza. Esta base consiste na estimativa a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDT) de demarcação das bacias hidrográficas da cidade (bacia Vertente Marítima) e na vetorização dos cursos naturais de drenagem (MESQUITA, 2018).

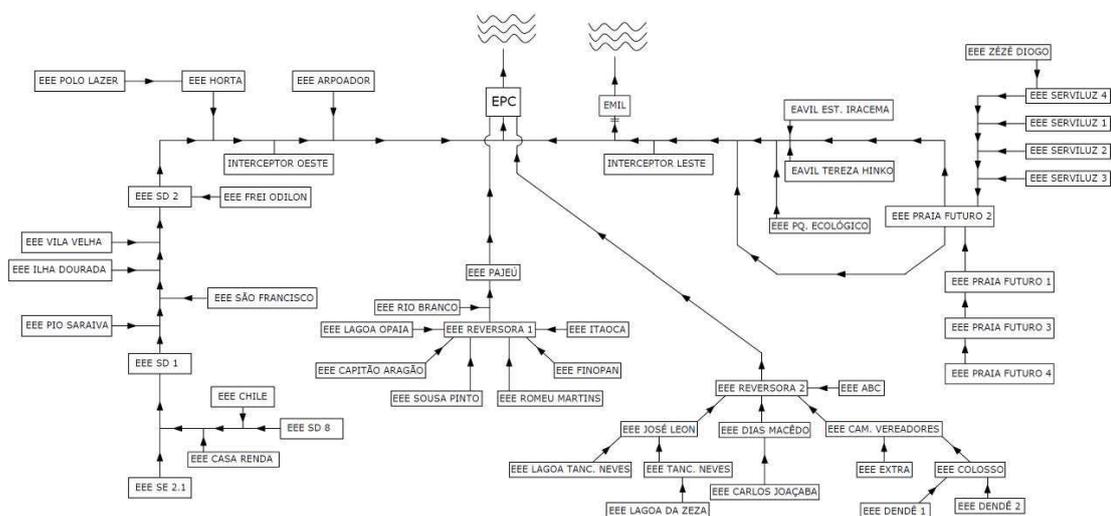
3.2 Modelagem Hidrológica-Hidráulica

3.2.1 Macro-sistema da Rede de Esgoto

Para realizar o estudo foram coletados dados referentes à rede coletora de esgoto e rede de drenagem, como, por exemplo, vazões, os tipos de materiais constituintes, extensão, dimensão de tubulação, batimetria, vazões e outras variáveis que afetam o funcionamento da rede coletora de esgoto. Tais dados foram fornecidos pela CAGECE. O presente trabalho faz parte de um projeto que é uma parceria entre a FUNCAP, Universidade Federal do Ceará (UFC) e CAGECE por meio do Edital de Chamamento Público 02/2021.

A Figura 8 detalha o funcionamento do macro-sistema de esgotamento sanitário com o IL e IO sendo responsável por encaminhar o efluente de esgotos domésticos gerado na região à Estação de Pré-condicionamento de Esgoto (EPC), de onde o efluente é direcionado a um emissário submarino.

Figura 8 – Rede de Esgoto Sanitária de Fortaleza



Fonte: esquema adaptado fornecido pela CAGECE.

Este trabalho irá estudar o IL que possui aproximadamente 7,5km de extensão em tubulações de concreto armado com diâmetros que variam de 900 a 1.750mm (PEREIRA *et al.*, 2021). Conforme dados fornecidos pela CAGECE o sistema possui 7 Estações Elevatórias de Esgoto (EEE), sendo elas: Praia do Futuro 2 (PF2), Parque Ecológico, Tereza Hinko, Praia de Iracema, Emil, Pajeú e Reversora 2 (Tabela 2).

Tabela 2 – Dados da vazão das Estações Elevatórias do sistema de esgotamento sanitário.

Estações Elevatórias	Vazão (L/s)
Emil	402,77
Estátua de Iracema	70,55
Pajeú	400,00
Parque Ecológico	170,00
Praia do Futuro 2	119,43
Tereza Hinko	402,77
Reversora 2	100,00

Fonte: CAGECE, 2024.

O mapa apresentado na Figura 9 destaca a localização das estações elevatórias Emil e Tereza Hinko, bem como dos Poços de Visita (PVs) 15 e 41, que foram objetos centrais de análise e comparação neste estudo. A representação visual desses pontos de interesse é fundamental para uma compreensão abrangente da distribuição da infraestrutura do sistema de esgoto e sua relação com o ambiente circundante. Essa visualização proporciona uma percepção valiosa sobre a configuração espacial da rede, ajudando a identificar padrões e tendências importantes que podem influenciar o desempenho do sistema.

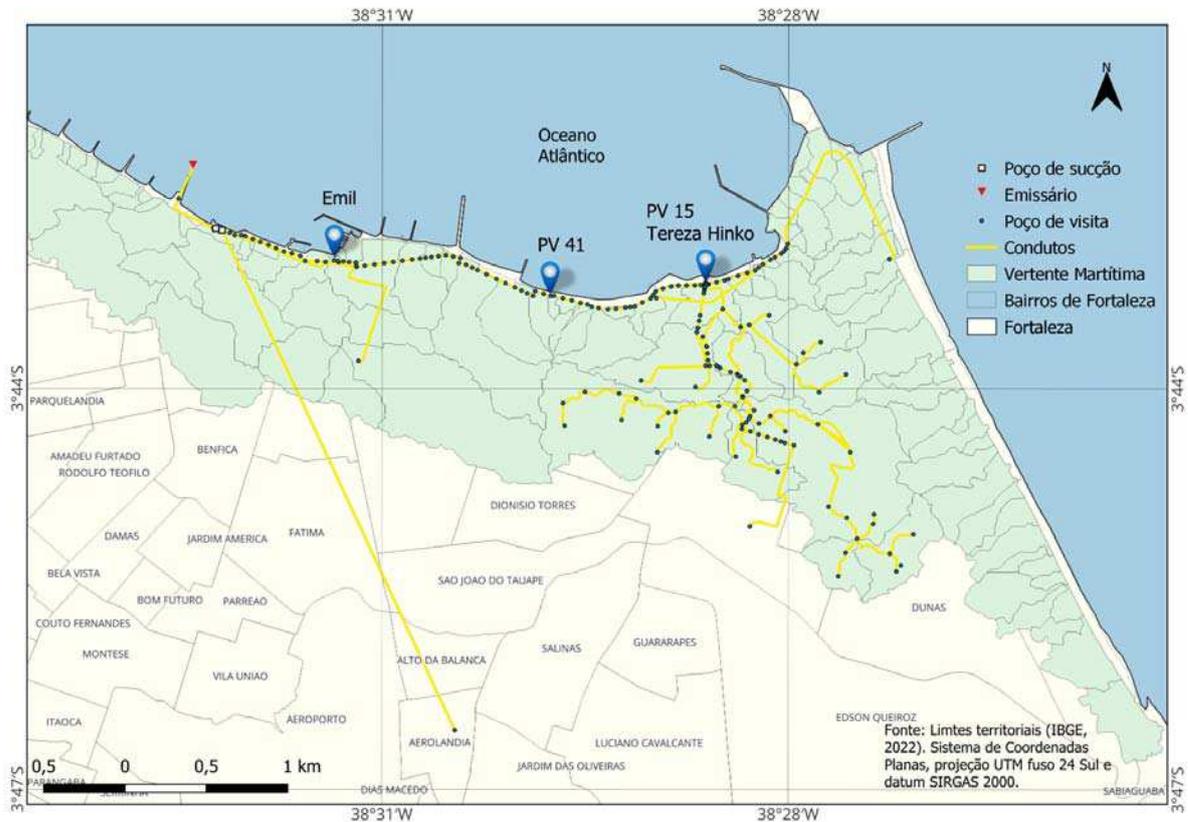
Além disso, o mapa destaca a interconexão entre os diferentes componentes da rede, mostrando como as estações elevatórias estão posicionadas em relação aos pontos de coleta e descarga de esgoto. Essa representação visual é crucial para identificar possíveis pontos de extravasamento ou áreas de vulnerabilidade na rede, fornecendo assim informações essenciais para o planejamento e o gerenciamento eficaz do sistema de esgoto.

3.2.2 Dados pluviométricos

A Equação 3.1 representa a fórmula de chuvas intensas para Fortaleza desenvolvida com base em 30 anos de registros pluviográficos contínuos (1970 a 1999), a estação meteorológica do Pici está localizada na UFC (SILVA *et al.*, 2013).

$$i = \frac{2345,29.Tr^{0,173}}{(t + 28,31)^{0,904}} \quad (3.1)$$

Figura 9 – Localização do Emil, Tereza Hinko. PV 15 e PV 41



Fonte: elaborado pelo autor.

Onde:

Tr: é o período de retorno da precipitação em anos;

i: é a intensidade média de chuva mm/h para uma duração em minutos;

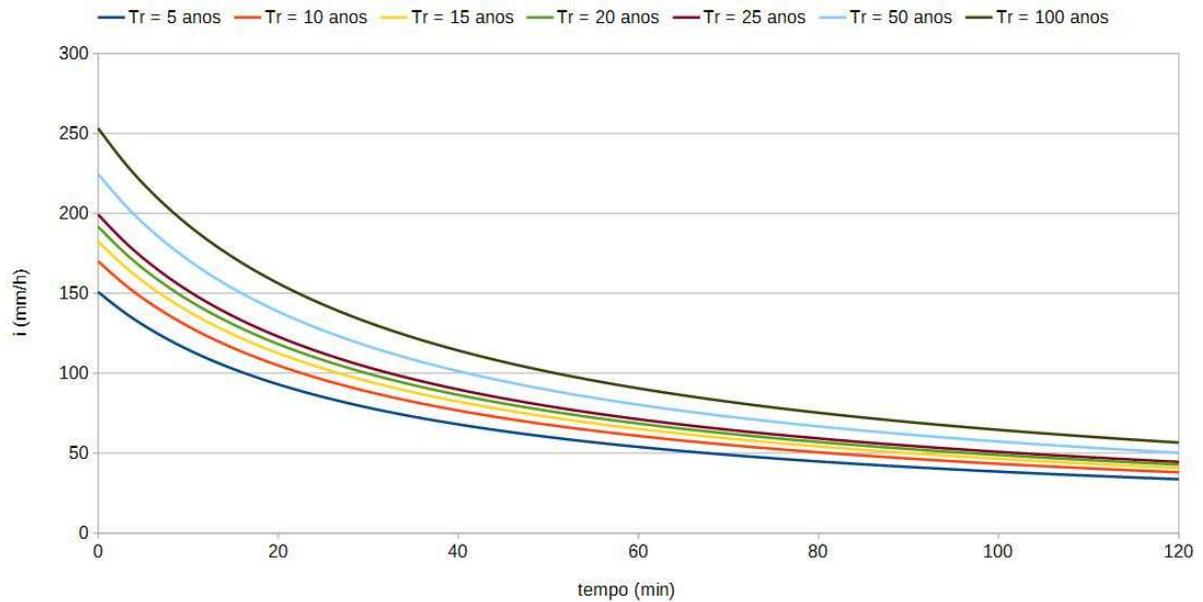
t: é o tempo de duração da chuva em minutos.

O Período de Retorno (Tr), a duração da chuva (t) e a intensidade de chuva (i) estabelecem uma relação conhecida como curva de IDF (Figura 10), representada por uma curva exponencial ou hiperbólica, sendo utilizada para estimar os níveis de precipitação extrema.

É importante destacar que os tempos de retorno são utilizados na engenharia hidrológica para estimar a probabilidade de ocorrência de eventos extremos, como chuvas intensas. Ao considerar diferentes períodos de retorno, podemos avaliar a capacidade do sistema de esgoto de lidar com situações de inundação em diversas escalas temporais, desde eventos mais frequentes até aqueles mais raros, porém mais intensos (KOUTSOYIANNIS *et al.*, 1998).

O *software* PCSWMM Professional 2D com a licença estudantil, possui recursos para criar e manipular curvas IDF, oferece uma interface gráfica que permite importar dados,

Figura 10 – Intensidade, Duração e Frequência para estação pluviométrica do Pici elaborada com a equação de (SILVA *et al.*, 2013)

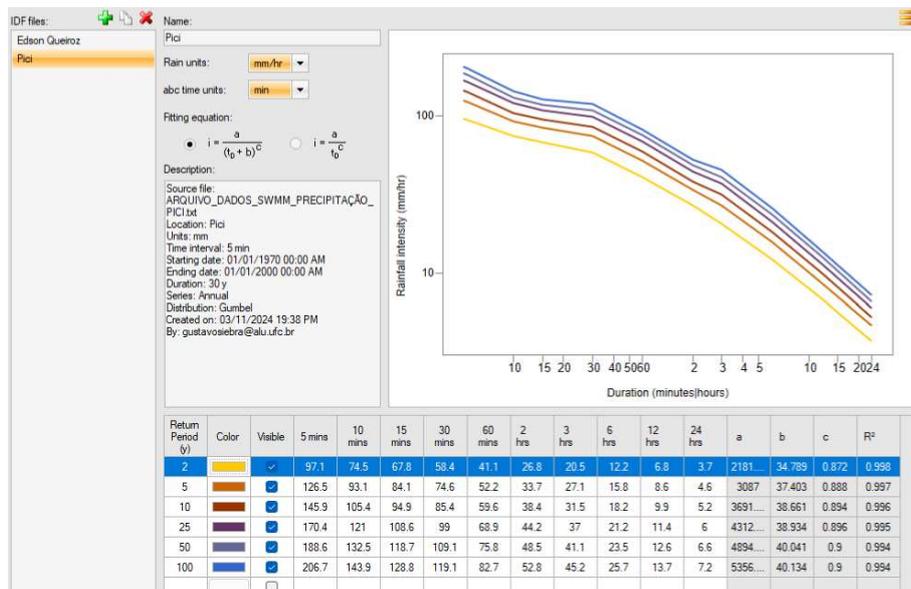


Fonte: elaborado pelo autor.

calcular os parâmetros a, b e c (constantes diretamente dependentes do local) com base nos dados do usuário e plotar as curvas IDF no painel de gráficos (MANUAL DO PCSWMM, 2024).

Para validar a precisão do *software*, foram utilizados os dados da estação do Pici pra gerar a curva IDF (Figura 11) com distribuição Gumbel do tipo simétrica. Assim, foi possível estimar as precipitações máximas para diferentes períodos de retorno, resultando em valores aproximados em relação a Figura 10.

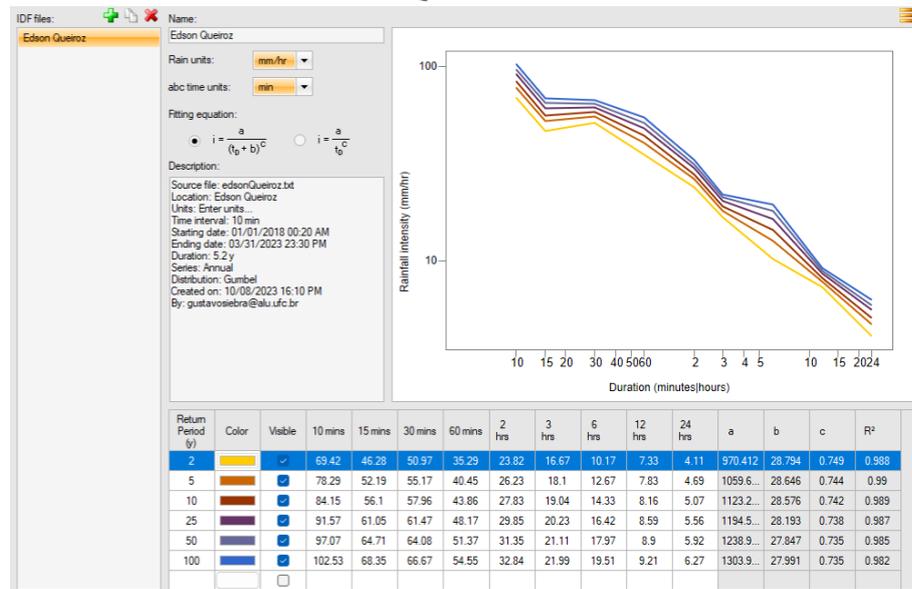
Figura 11 – Curva IDF gerado pelo PCSWMM para a estação pluviométrica do Pici



Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, este trabalho utiliza a base do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) com o passo horário dos últimos 5 anos de 2018 a 2023 usando os dados pluviográficos da estação do Edson Queiroz, a estação mais próxima da área de estudo. Após a inserção desses dados no PCSWMM, foi possível gerar as IDF, conforme ilustrado na Figura 12. Os resultados obtidos revelaram uma boa consistência ao longo da série histórica analisada.

Figura 12 – Curva IDF gerado pelo PCSWMM para a estação pluviométrica do Edson Queiroz



Fonte: elaborado pelo autor.

Para complementar a análise, criou-se cenários para simulações considerando os tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos para os PVs 15 e 41, selecionando o dia 18 de janeiro de 2023 como referência. Escolheu-se essa data específica devido à ocorrência de extravasão em ambas estações Emil e Tereza Hinko, proporcionando uma oportunidade valiosa de avaliar o desempenho do sistema em condições críticas.

3.3 Parâmetros RTK

A metodologia RTK é utilizada para estimar o volume de escoamento pluvial que ocorre em sistemas de drenagem urbana, conhecido como RDII. Essa metodologia, aplicada no *software* PCSWMM, combina informações sobre a precipitação pluviométrica com parâmetros hidráulicos e topográficos do sistema de drenagem para calcular o volume de RDII.

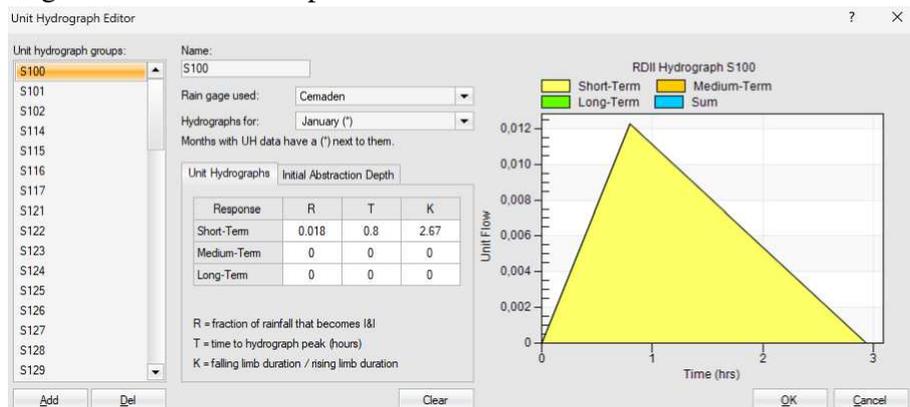
O parâmetro R representa a fração do volume de precipitação que entra no esgoto

sanitário. O parâmetro T é o tempo de pico do influxo rápido, enquanto o parâmetro K representa a razão entre o tempo de recessão e pico. Esses parâmetros são utilizados no método RTK (Figura 13) para estimar as respostas do RDII de forma rápida, moderada e lenta, respectivamente, por meio do ajuste de até três hidrogramas unitários triangulares ao hidrograma observado do RDII.

Diferentemente da constante R , os valores de T e K podem ser calculados com base nas características de chuva de cada sub-bacia. Para isso, é necessário calcular o tempo de concentração (T_c), tempo de pico (t_p), tempo de base (t_b) do hidrograma a partir dos dados existente das bacias.

Foram consideradas as sub-bacias que contribuem para os sistemas de esgotamento sanitário. É importante destacar que o *software* não especifica uma metodologia para a determinação desses parâmetros o que permite a aplicação de diversos métodos a depender das características da bacia de estudo.

Figura 13 – Inserindo parâmetros do RTK no PCSWMM



Fonte: elaborado pelo autor.

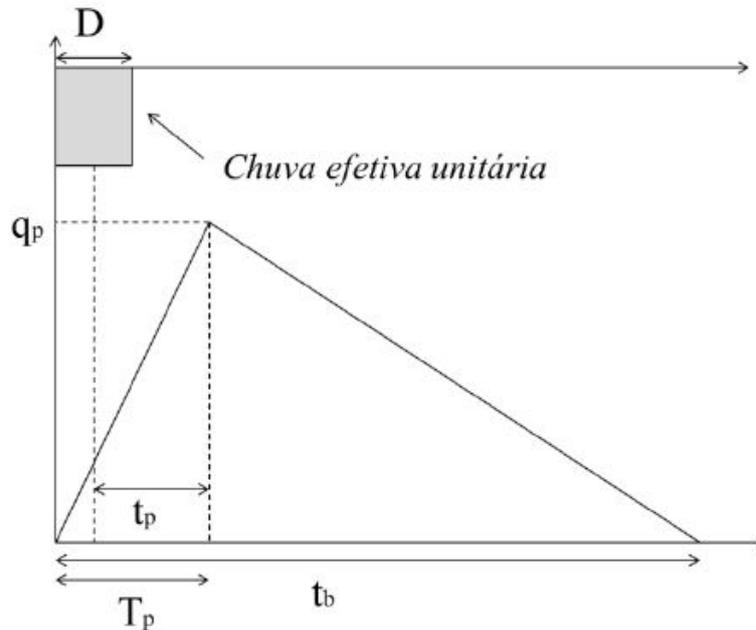
3.3.1 Propagação superficial

O modelo desenvolvido pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) do *U.S. Department Of Agriculture* (USDA) utiliza o hidrograma unitário sintético triangular, Figura 14. A forma do hidrograma unitário depende da área da bacia hidrográfica, da duração da chuva efetiva unitária e do tempo de concentração da bacia.

Segundo USDA (1986), o tempo de concentração da bacia (T_c) é um parâmetro crítico do NRCS. Esse parâmetro influencia na forma e no pico do hidrograma de escoamento.

Segundo Silveira (2005), o tempo de concentração seria o tempo entre o fim da chuva efetiva e o fim do escoamento superficial direto. Para o cálculo do tempo de concentração em

Figura 14 – Hidrograma unitário triangular



Fonte: Schuster (2014).

bacias hidrográficas é possível utilizar-se de métodos estritamente empíricos e semi-empíricos. Os métodos empíricos são mais simples, uma vez que consideram apenas os parâmetros geométricos da bacia e, por essa razão, são mais utilizados na prática de engenharia (MATA-LIMA *et al.*, 2007). Este trabalho usa a fórmula do tempo de concentração de Carter (Equação 3.2), sendo utilizada para bacias urbanas menores que 21km^2 (Tabela 3).

Tabela 3 – Características das fórmulas do tempo de concentração

Nome	Local	N. Bacias	Área (km ²)	S (%)	L (km)	Tipo
Carter	EUA	-	<21	<0,5	<12	Urbana
Desbordes	França	21	<51	<7	<18	Urbana
Eagleson	EUA	-	<21	-	-	Urbana
Espey	EUA	17	<91	-	-	Urbana
McCuen	EUA	48	0,4-16	<4	<10	Urbana
Schaake	EUA	19	<0,7	<7	<1,8	Urbana

Fonte: Silveira (2005).

$$T_c = 0,0977 * (L^{0.6}) * (S^{-0.3}) \quad (3.2)$$

Onde:

T_c : Tempo de concentração (horas);

L: comprimento do coletor pluvial ou canal principal (km);

S: declividade média do coletor pluvial ou canal principal (m/m);

O hidrograma unitário é definido por cinco parâmetros: a duração da chuva efetiva unitária (D); o tempo de pico (t_p), que é o tempo desde a metade da duração da chuva efetiva unitária até o pico de vazão do hidrograma unitário, calculado pela Equação:

$$t_p = 0,6.T_c \quad (3.3)$$

Onde:

T_c : tempo de concentração da bacia (horas).

O tempo de subida do hidrograma (T_p), é o tempo desde o início do evento chuvoso até o pico do hidrograma unitário, calculado pela Equação:

$$T_p = t_p + \frac{D}{2} \quad (3.4)$$

Onde:

T_p : Tempo de subida do hidrograma (horas);

D: Duração da chuva efetiva unitária (horas).

O tempo de base (t_b), é o tempo desde o início do evento chuvoso até o final do escoamento superficial no exutório da bacia, calculado pela Equação:

$$t_b = T_p + 1,67.T_p \quad (3.5)$$

O valor de K do RTK, é a relação entre o tempo de recessão do hidrograma unitário e o tempo de pico, calculado pela Equação:

$$K = \frac{t_b}{T_p} \quad (3.6)$$

A vazão de pico do hidrograma unitário (q_p), calculada pela Equação:

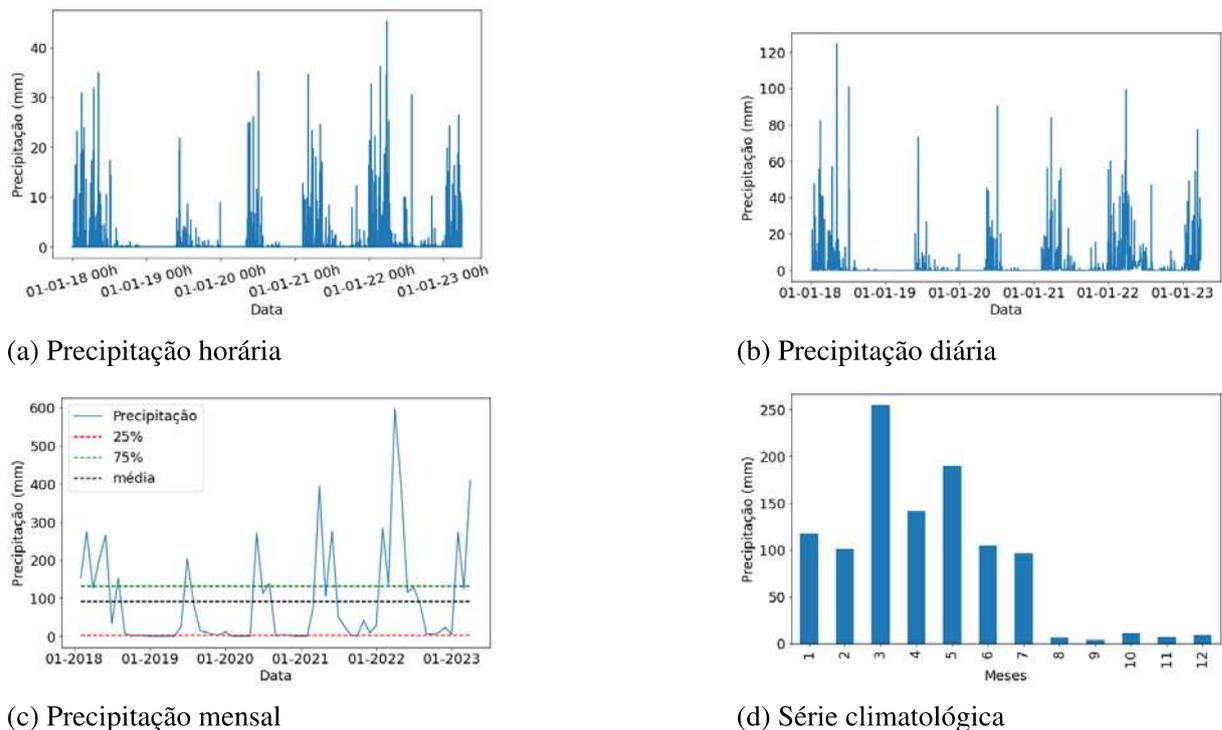
$$q_p = \frac{0,208.A}{T_p} \quad (3.7)$$

Onde: A: Área da bacia hidrográfica (km^2).

3.4 Análise temporal da estação pluviométrica do Edson Queiroz

A série histórica utilizada foi do posto pluviométrico do Edson Queiroz devido à proximidade do local de estudo, disponibilizada pelo CEMADEN. Para manipular os dados brutos em escala horária foi utilizado o *Python 3.1* para gerar os gráficos da Figura 15. A frequência de chuvas em Fortaleza é maior no primeiro semestre do ano, especialmente entre os meses de fevereiro a maio, na Figura 15d, nota-se que Março é o mês que mais chove.

Figura 15 – Série histórica da estação Edson Queiroz



Fonte: elaborado pelo autor.

3.5 Cenários

Dado que a abordagem RTK tem sido amplamente adotada, incluindo em Singapura (IRVINE; CHUA, 2016), e demanda relativamente menos parametrização, foi a metodologia selecionada para este estudo. Não existe um método teórico para determinar R, T e K. Eles devem ser determinados empiricamente para cada sistema com base na comparação de um hietógrafo de precipitação medido com o fluxo de esgoto medido em tempo úmido (MANUAL BENTLEY STORMCAD, 2024).

Em geral, R será maior para sistemas que apresentam problemas significativos de

infiltração e afluência do que para sistemas estanques. T será maior para bacias hidrográficas maiores e será maior para infiltração lenta do que para influxo rápido. K geralmente é da ordem de 1,5 a 2,67. A soma dos valores de R para todos os componentes deve ser positiva, mas menor que 1. As unidades padrão para T são horas, enquanto R e K são adimensionais (MANUAL BENTLEY STORMCAD, 2024).

Os valores iniciais de T e K foram calculados com base na avaliação empírica da fórmula do tempo de concentração de Carter para o conjunto de sub-bacias observadas, enquanto R foi ajustado através da calibração dos cenários: 2, 4, 8, 10, 25 e 35 sub-bacias (Figura 16).

3.5.1 Calibração do modelo

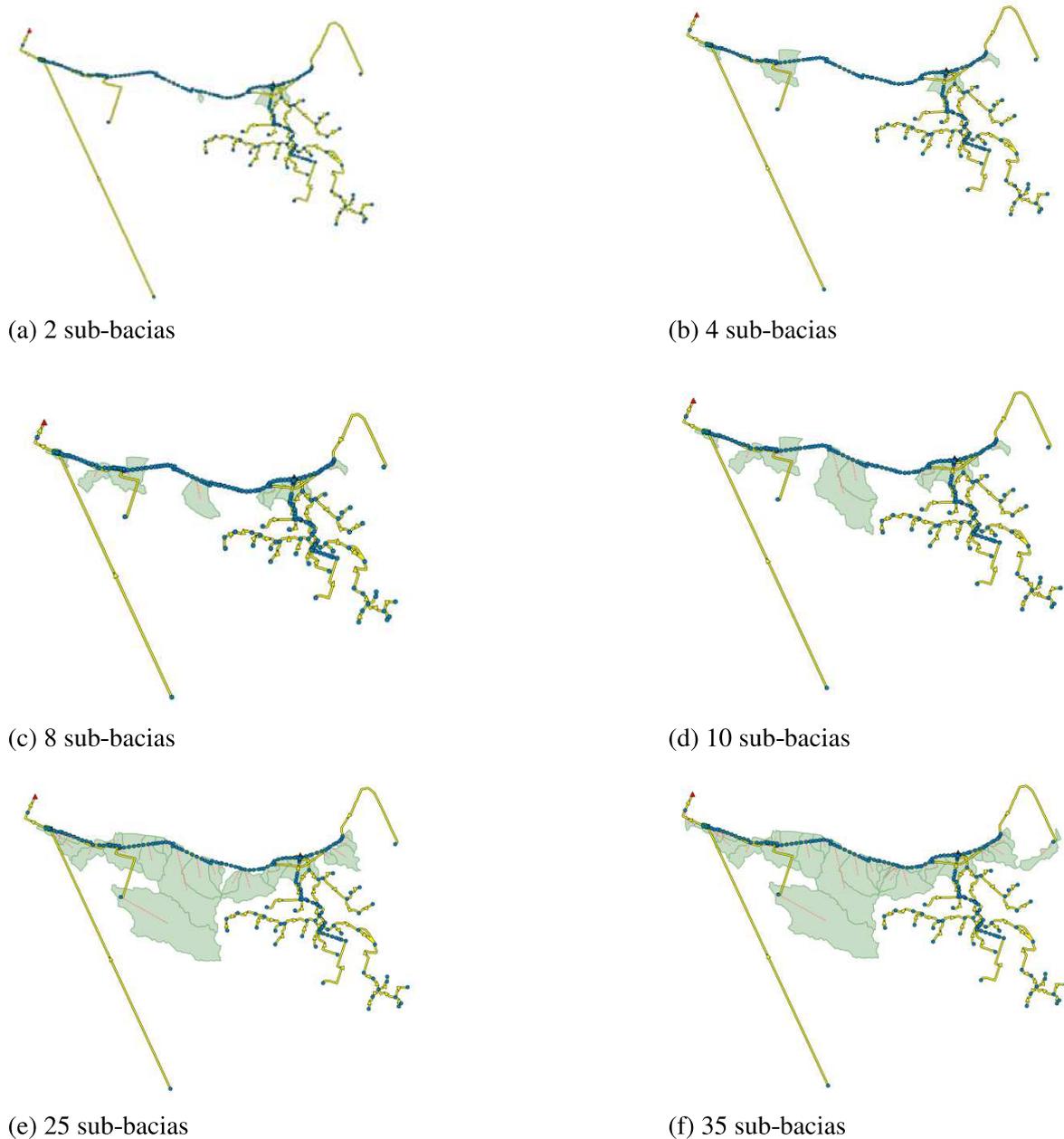
Primeiramente, ao selecionar os dados para treinamento do modelo foi adotado um período de 16 dias do mês de Janeiro, compreendido entre os dias 10 e 25 de janeiro de 2023. Essa escolha foi feita com base na disponibilidade de dados dos relatórios do EMIL e Tereza Hinko e na representatividade do período em relação às condições climáticas e operacionais da rede de esgoto. O objetivo dessa fase foi calibrar o modelo inicial, ajustando seus parâmetros para refletir com precisão as características e o comportamento da rede.

Ao analisar a sensibilidade da rede de esgoto em relação aos valores de entrada, foram elaborados seis cenários distintos, considerando o número variável de sub-bacias que contribuem com a entrada de água pluvial na rede. Essa abordagem nos permitiu avaliar o impacto das diferentes configurações da rede sobre o seu desempenho.

Em cada cenário (Anexo A), desenvolvemos hidrogramas unitários para cada sub-bacia, como também o cálculo do tempo de concentração, permitindo-nos determinar os valores de T e K, parâmetros essenciais para a modelagem hidrológica. O fator R, por sua vez, foi definido empiricamente, com valores variando de 0,001 a 0,06 de acordo com a literatura.

As simulações foram realizadas com o auxílio de recursos computacionais, sendo que o custo computacional para cada simulação de R foi de aproximadamente 12 minutos. Essa consideração é importante, pois reflete a complexidade computacional envolvida na modelagem de sistemas hidrológicos e ressalta a importância de técnicas eficientes de processamento de dados e simulação.

Figura 16 – Cenários de simulação



Fonte: elaborado pelo autor.

3.5.2 Validação do modelo

Para validar o modelo, foi adotado um período mais extenso de 65 dias, que compreende o intervalo de 01 de janeiro a 06 de março de 2023. Esses meses têm uma alta incidência de precipitação na cidade de Fortaleza. Para a realização dessa simulação o custo computacional foi de aproximadamente 42 minutos. Os dados de extravasamento obtidos nas simulações dos PVs 15 e 41 foram comparados aos dados de nível das EEE. Estes estão associados a episódios de extravasamentos nos referidos PVs. Essa etapa foi crucial para checar o desempenho do modelo

em condições mais diversas e representativas, além de verificar sua capacidade de generalização para períodos diferentes daquele utilizado para treinamento.

3.6 Software de simulação

As simulações conduzidas neste estudo foram realizadas utilizando o *software* PCSWMM, uma ferramenta que oferece uma visualização dinâmica da rede por meio da modelagem hidráulica. Esta abordagem permitiu uma representação detalhada do comportamento do sistema de esgoto, possibilitando a calibração das variáveis para obter resultados mais precisos e próximos da realidade. Com o auxílio deste *software*, foi possível simular cenários variados e explorar diferentes configurações da rede, contribuindo assim para uma compreensão mais profunda de seu funcionamento.

Para realizar as simulações, foram utilizados dados de batimetria, localização dos PVs e seus diâmetros, dados de vazão das estações elevatórias, relatório de monitoramento dos níveis da Tereza Hinko e Emil fornecidos pela CAGECE, a empresa responsável pelo sistema de esgoto na região estudada. As simulações foram executadas em um notebook equipado com um processador Intel Core i7 de 12ª geração, 16GB de memória RAM e uma placa de vídeo GeForce RTX 3060. Esta configuração robusta proporcionou o desempenho necessário para executar as simulações de forma eficiente e precisa, garantindo assim resultados confiáveis e significativos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise temporal de extravasamento

Para analisar o extravasamento, a CAGECE forneceu os relatórios de nível referentes aos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2023 das estações elevatórias Emil e Tereza Hinko. Com base nessas informações, juntamente com os dados pluviométricos da estação Edson Queiroz, foi possível gerar estatísticas descritivas importantes da distribuição dos dados (Tabela 4), permitindo a identificação e relação da data com a quantidade de precipitação em cada dia (Figura 17).

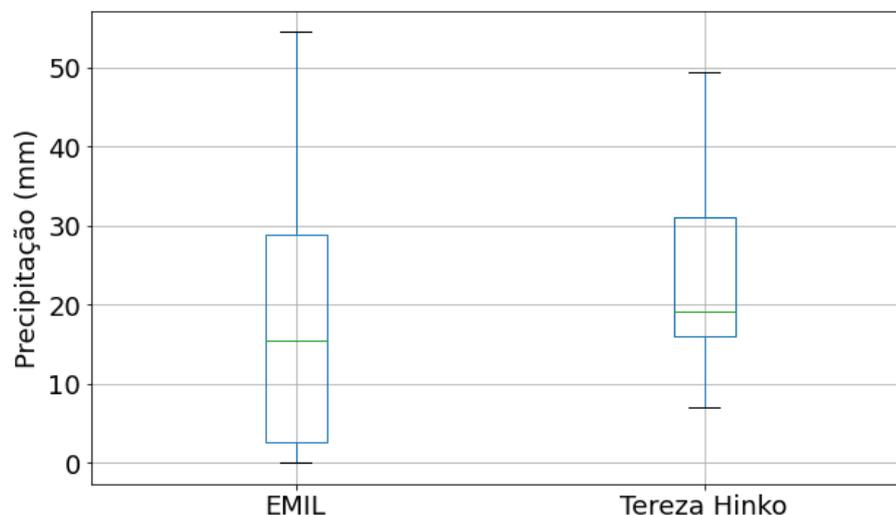
Em Pereira *et al.* (2021), observaram que o IL possui capacidade para suportar eventos chuvosos com intensidades inferiores a 10 mm/h, desde que não mais que 5% da área das sub-bacias contribua indevidamente para o interceptor.

Tabela 4 – Dados estatísticos

	Estação pluviográfica Edson Queiroz	EE Emil	EE Tereza Hinko
Dias	65	19	6
Média (mm)	6,98	17,45	24,05
Desvio padrão (mm)	12,12	17,09	15,31
Mínimo (mm)	0,00	0,00	6,91
25,00% (mm)	0,00	2,65	15,96
50,00% (mm)	1,19	15,38	19,08
75,00% (mm)	7,68	28,77	30,96
Máximo (mm)	54,48	54,48	49,37

Fonte: elaborado pelo autor.

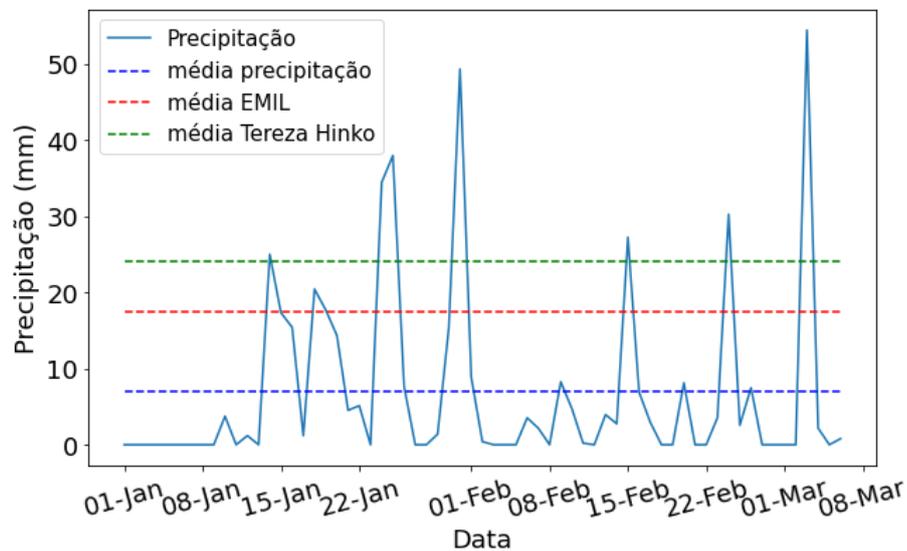
Figura 17 – Boxplot de extravasão do Emil e Tereza Hinko



Fonte: elaborado pelo autor.

Observando a Figura 18, pode-se afirmar que quando ocorre extravasamento na estação Tereza Hinko em média 24mm de precipitação, na estação Emil ocorre com 17mm. No que diz respeito aos gráficos apresentados na Figura 19a, eles demonstram o comportamento da estação Emil em relação à precipitação durante o mesmo período, revelando uma cota de extravasão de 2,60m. Por outro lado, na Figura 19b, o gráfico relaciona o nível da estação Tereza Hinko com a precipitação, mostrando uma cota de extravasão de 2,80m. Para a realização da simulação, busca-se reproduzir o comportamento observado, o que demanda a calibração das diversas variáveis do modelo.

Figura 18 – Precipitação dos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2023 na bacia Vertente Marítima, em Fortaleza, Ceará

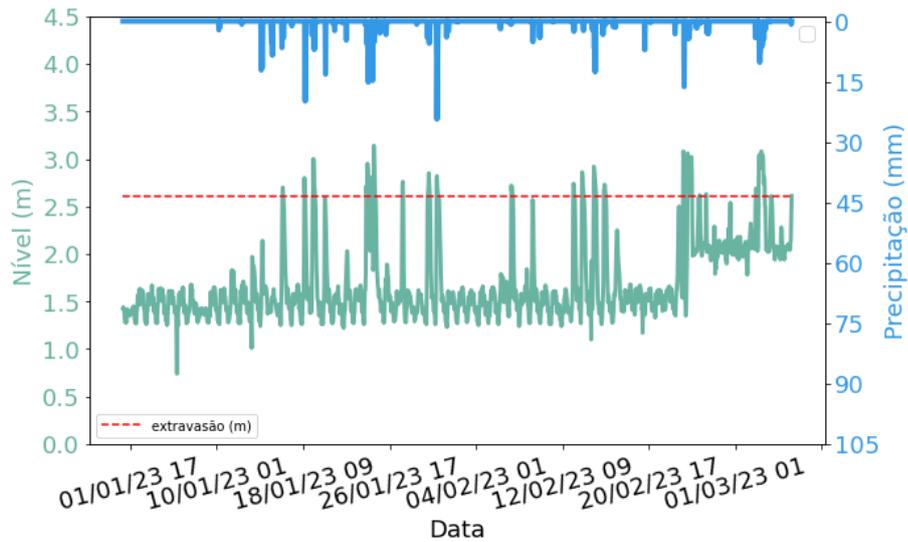


Fonte: elaborado pelo autor.

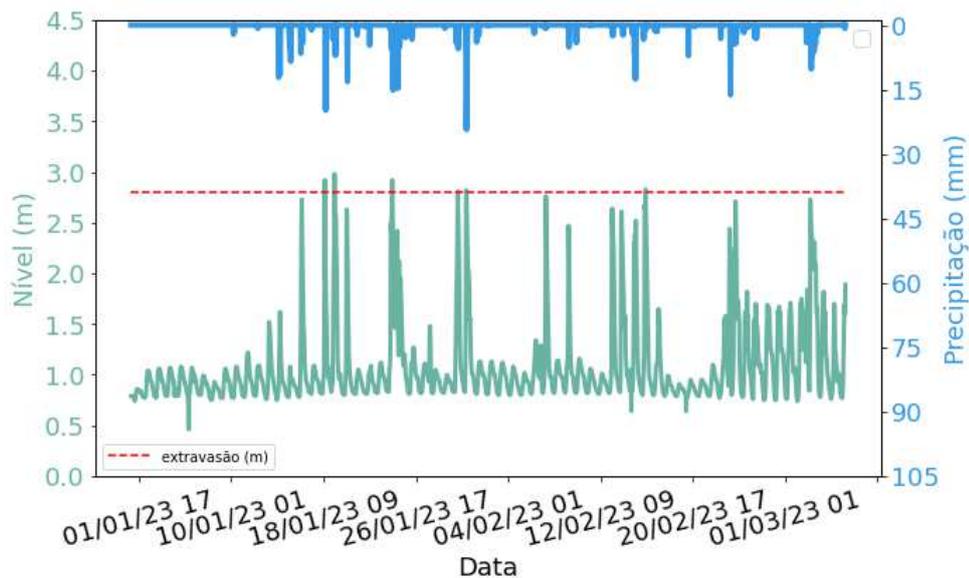
4.2 Simulação PCSWMM

Na Figura 20, é apresentado o perfil longitudinal do Interceptor Leste, que se estende do PV 1 até o Emissário Submarino. Este perfil oferece uma representação detalhada da topografia ao longo do trajeto, destacando as elevações do terreno e o dimensionamento das tubulações ao longo do sistema. A visualização proporcionada pelo perfil longitudinal é fundamental para compreender a configuração física da infraestrutura do interceptor, fornecendo informações essenciais sobre a inclinação do terreno, as variações na altitude e a distribuição das tubulações ao longo do percurso. Esses detalhes são cruciais para o planejamento, o projeto e a manutenção eficaz do sistema de esgoto, permitindo uma avaliação precisa da capacidade de drenagem e do funcionamento hidráulico do interceptor.

Figura 19 – Séries temporais de nível e precipitação, destacando o limite de extravasão



(a) Emil

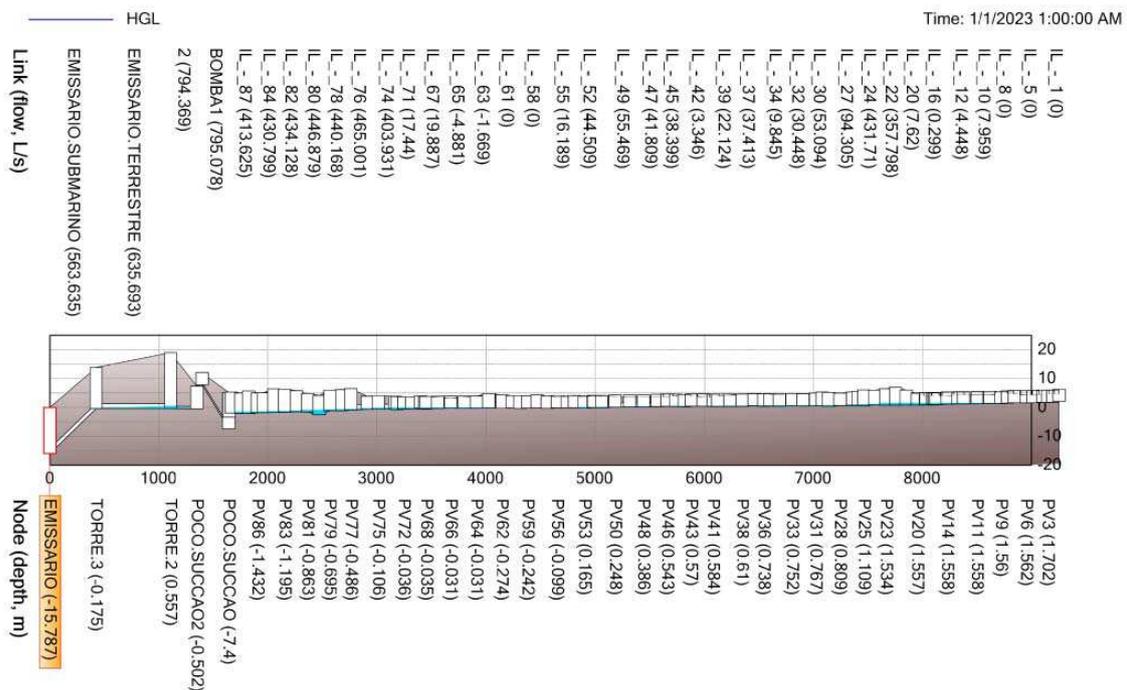


(b) Tereza Hinko na bacia Vertente Marítima, em Fortaleza, Ceará

Fonte: elaborado pelo autor.

Para alcançar uma compreensão mais profunda do processo de determinação do valor ótimo de R e sua relação com a sensibilidade da rede de esgoto, é essencial explorar detalhadamente as etapas e os resultados obtidos em cada fase da análise. Portanto, será analisado mais profundamente cada parte do processo e discutir suas implicações.

Figura 20 – Perfil longitudinal do Interceptor Leste na bacia Vertente Marítima, em Fortaleza, Ceará



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.1 Calibração do modelo

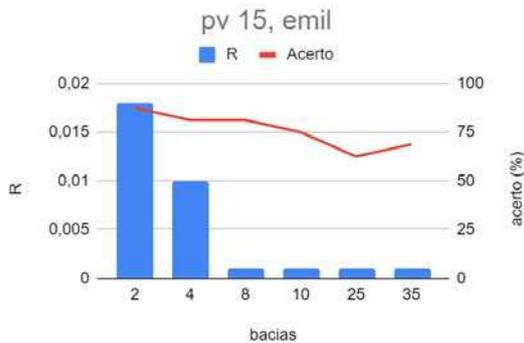
Ao consolidar os resultados das simulações, foi observado uma variação significativa no desempenho do modelo em relação ao valor de R e ao número de sub-bacias consideradas. Na Figura 21, podemos observar a relação entre o valor de R e a precisão do modelo para cada cenário. Nota-se que o acerto do modelo varia em função do número de sub-bacias e do valor de R utilizado.

Para as sub-bacias 10, 25 e 35, foi verificado que o melhor acerto do modelo foi igual ou inferior a 75%, com valor de R sendo inferior a 0,005, acima disso o sistema entra em colapso. Isso sugere uma baixa sensibilidade do modelo a esses parâmetros nesses cenários específicos, indicando a necessidade de ajustes ou considerações adicionais para melhorar a precisão do modelo nessas condições.

Para 8 sub-bacias, o valor de R se mantém baixo, garantindo uma precisão de 75% ou mais. Entretanto, ao considerar 4 sub-bacias, a sensibilidade de R atinge 0,01, embora ainda resulte em extravasão em diversos pontos da rede.

Por outro lado, foi observado que, para o cenário com 2 sub-bacias (S19 e S53), o acerto do modelo foi igual ou superior a 75%, com valores de R variando entre 0,01 e 0,02.

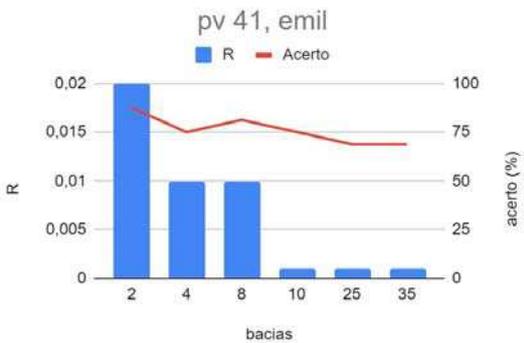
Figura 21 – Simulação dos melhores cenários de R para diferentes sub-bacias



(a) PV15 Emil



(b) PV15 Tereza Hinko



(c) PV41 Emil



(d) PV41 Tereza Hinko

Fonte: elaborado pelo autor.

Isso sugere uma maior sensibilidade do modelo a esses parâmetros nesse cenário específico, indicando uma relação mais direta entre o valor de R e o desempenho do modelo.

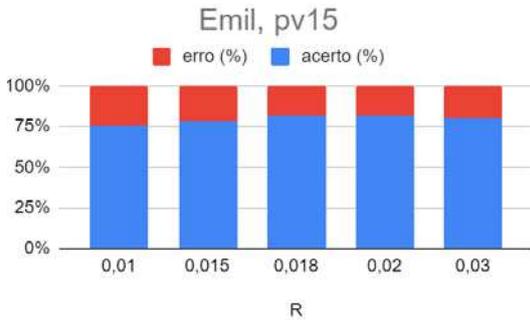
4.2.2 Validação do modelo

O cenário que se destacou como o mais promissor envolveu apenas 2 sub-bacias (S19 e S53), com um valor de R fixado em 0,01. Os resultados obtidos nessas simulações prolongadas, ilustrados na Figura 22, revelam uma taxa de acerto superior a 75%.

No entanto, é importante ressaltar que, ao compararmos o desempenho das estações Emil e Tereza Hinko, sendo observado diferenças significativas. O número de dias de extravasão registrado nos relatórios de nível diverge consideravelmente entre as duas estações, sendo que o Emil apresentou extravasamento em 19 dias, enquanto a Tereza Hinko registrou apenas 6 dias.

Essa discrepância nos resultados ressalta a importância de uma análise mais aprofundada do desempenho de cada estação elevatória e de sua interação com a rede de esgoto como um todo. Fatores como a capacidade de bombeamento, a localização estratégica das estações, a topografia, diâmetro do IL e a metodologia do RTK a curto prazo podem influenciar

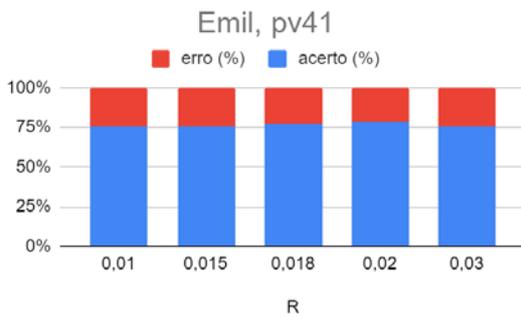
Figura 22 – Simulação do R para Jan/Fev/Mar de 2023



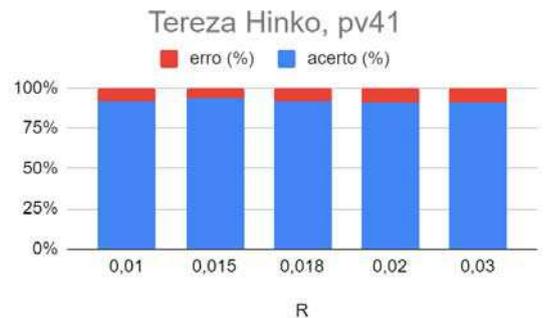
(a) Emil, PV 15



(b) Tereza Hinko, PV 15



(c) Emil, PV 41



(d) Tereza Hinko, PV 41

Fonte: elaborado pelo autor.

significativamente a ocorrência do extravasamento.

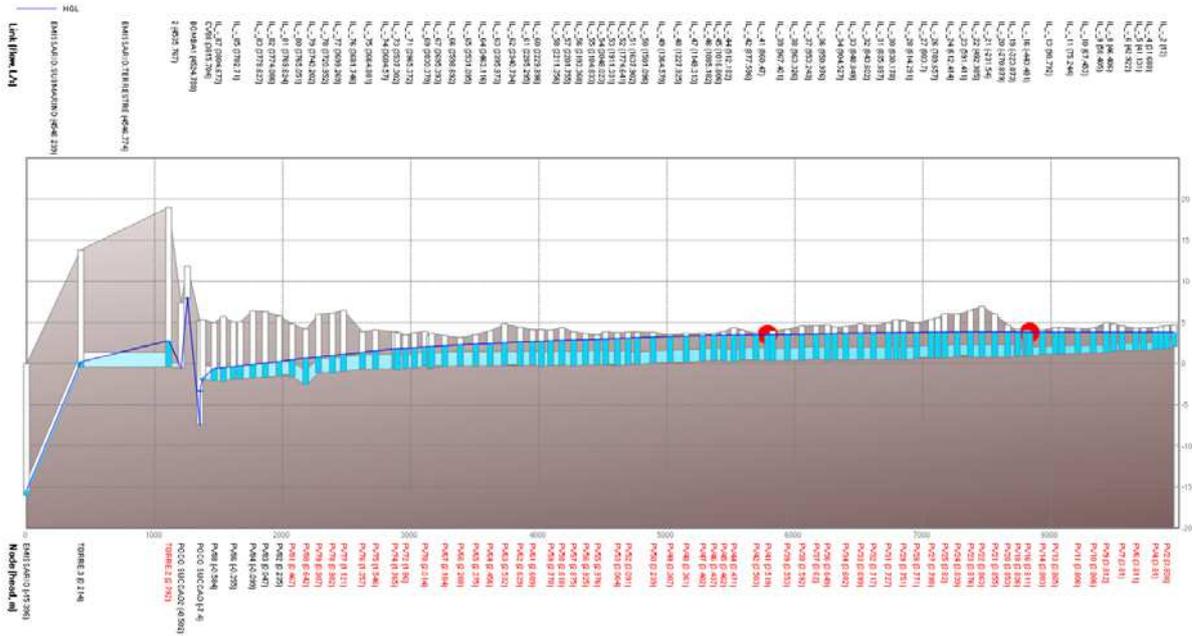
Nas sub-bacias S19 e S53, os valores de curto prazo mostram-se dentro da faixa observada em outros estudos (IRVINE *et al.*, 2023; MANUAL BENTLEY STORMCAD, 2024; KIM *et al.*, 2016; CDM SMITH, 2016; STANTEC, 2021), indicando uma calibração adequada para o contexto específico.

A Figura 23, mostra a extravasão dos PV 15 e 41 no perfil longitudinal do IL na fase de calibração em 31 de Janeiro de 2023, sendo verificado que, o sistema esta operando em sobrecarga.

4.2.3 Simulação com Tempo de Retorno

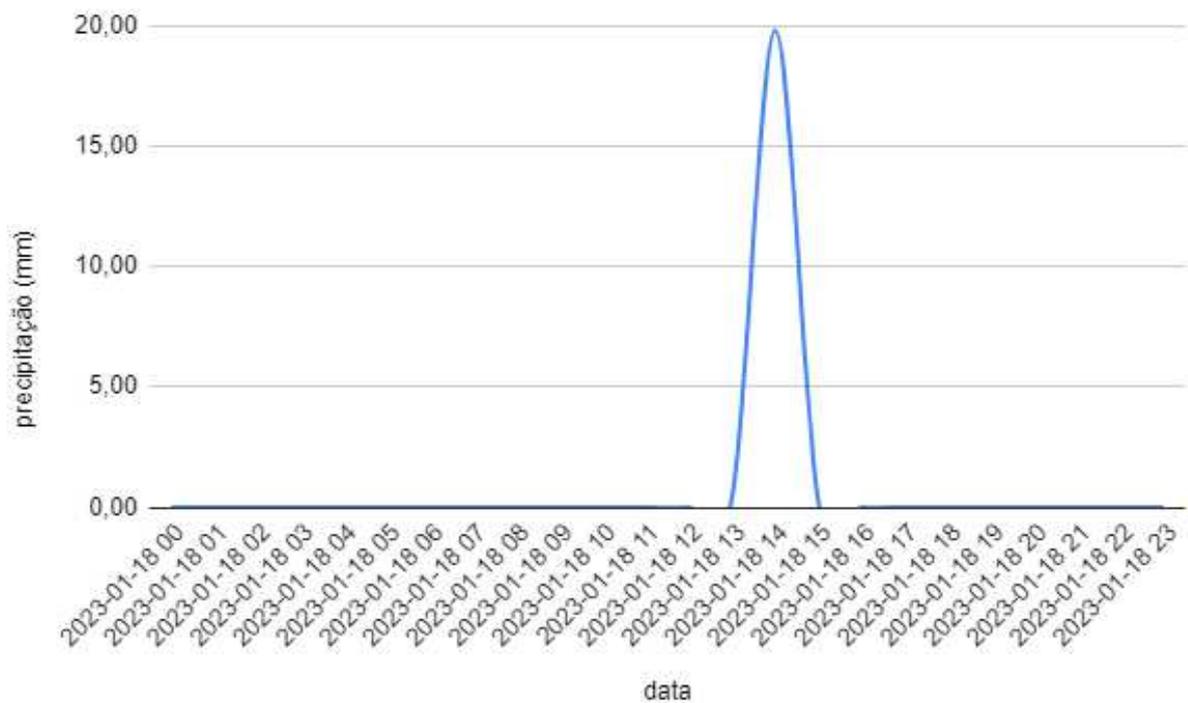
Nas Figuras 25a e 25b, observou-se durante as simulações um aumento significativo no volume de água na rede de esgoto, o que influenciou diretamente no comportamento do sistema. O valor do parâmetro R igual 0,01 calibrado e validado na seção anterior apresentou desempenho ótimo quando comparado ao relatório do dia 18 de janeiro de 2023 (Figura 24), conseguindo replicar o comportamento do nível dos PVs 15 e 41 para o Tr de 2, 5 e 10 anos.

Figura 23 – Perfil longitudinal do Interceptor Leste detalhando a extração nos PVs 15 e 41



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 24 – Precipitação do dia 18 de Janeiro de 2023

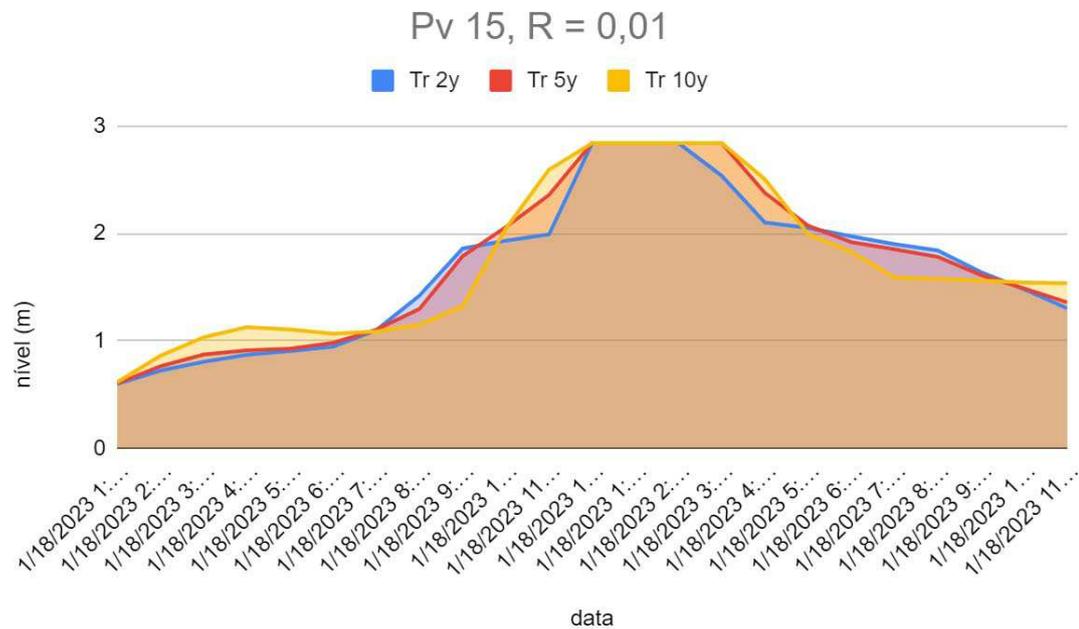


Fonte: elaborado pelo autor.

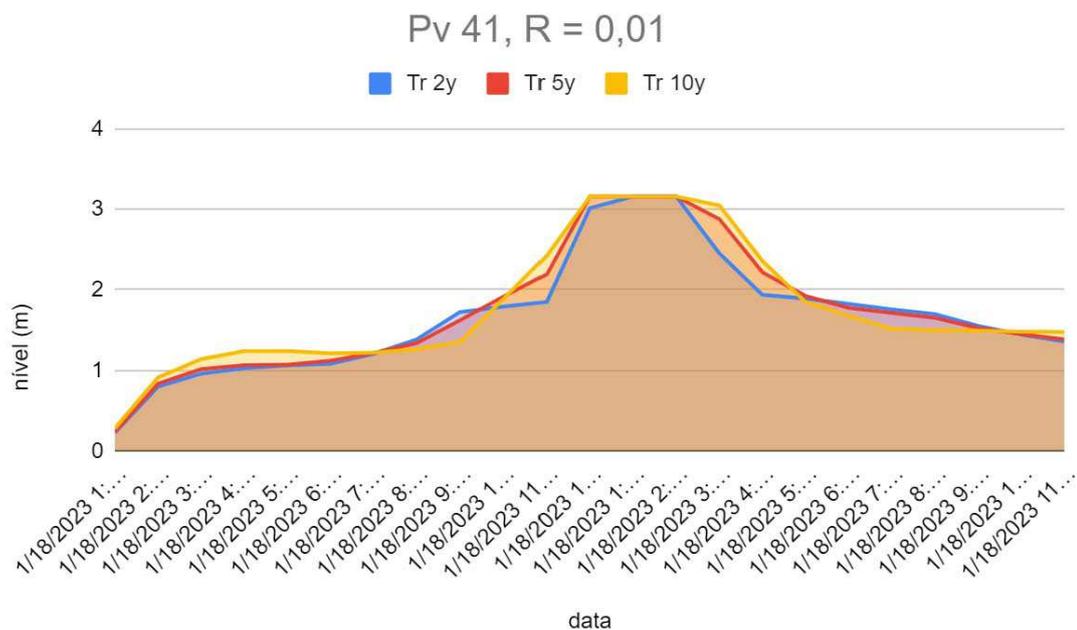
4.2.4 Discussão sobre possíveis soluções

Para as medidas não estruturais, recomenda-se a realização de testes de fumaça para identificar infiltrações na rede e corrigir os problemas encontrados. Além disso, é fundamental

Figura 25 – Tempo de retorno para 2, 5 e 10 anos com R=0,01



(a) PV 15



(b) PV 41

Fonte: elaborado pelo autor.

promover campanhas de conscientização sobre o impacto dos sistemas de drenagem urbana e resíduos sólidos no esgotamento sanitário.

As Soluções Baseadas na Natureza (SBN) oferecem abordagens sustentáveis, utilizando processos naturais para enfrentar desafios ambientais, sociais e econômicos. Na gestão de recursos hídricos, elas podem ser aplicadas por meio de áreas verdes, *wetlands* construídos,

drenagem natural, telhados verdes e recuperação de margens de rios. Esses sistemas complementam as infraestruturas tradicionais, minimizando impactos ambientais e aumentando a eficiência. As medidas estruturais, como a adequação da área de contribuição, melhorias no sistema de drenagem, uso de jardins filtrantes e dimensionamento correto das tubulações, são igualmente cruciais. O modelo deste estudo permite simular esses cenários e propor soluções eficazes.

Para solução não estrutural foram realizadas simulações para diferentes valores de R (1%, 0,5% e 0,1%) (Figura 26). Observa-se que, quanto menor o valor de R, menor será o extravasamento no sistema de esgoto sanitário, indicando que o problema pode estar relacionado à drenagem da sub-bacia.

Na solução estrutural foram realizadas simulações que comparam a tubulação original com a nova tubulação proposta (Tabelas 7 e 8), com o objetivo de aumentar a capacidade de transporte e reduzir os riscos de falhas no sistema. Na nova configuração, o sistema operará sem sobrecargas ou extravasamentos, suportando a nova vazão sem a necessidade de redimensionar a EPC.

Tabela 7 – Tubulação original

Trechos	Diâmetro (mm)
PV 01 ao PV 10	900
PV 10 ao PV 17	1000
PV 17 ao PV 51	1500
PV 51 ao PV 74	1750
PV 74 ao PV 88	1750

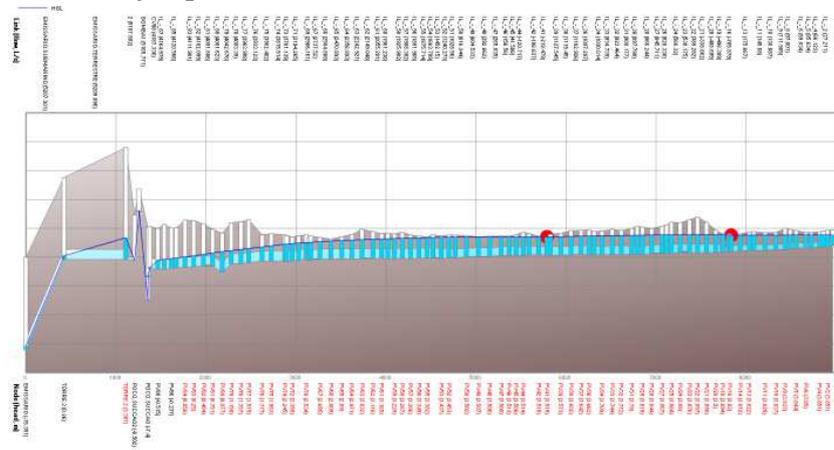
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Proposta da nova tubulação

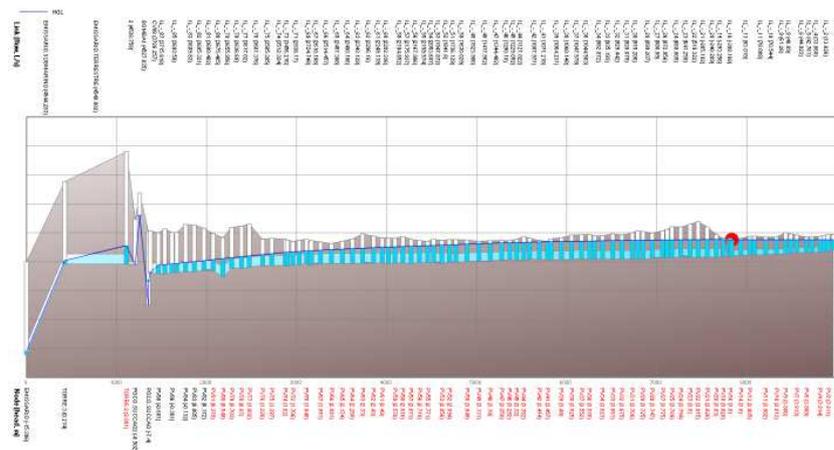
Trechos	Diâmetro (mm)
PV 01 ao PV 10	1500
PV 10 ao PV 17	1750
PV 17 ao PV 51	2000
PV 51 ao PV 74	2500
PV 74 ao PV 88	2500

Fonte: elaborado pelo autor.

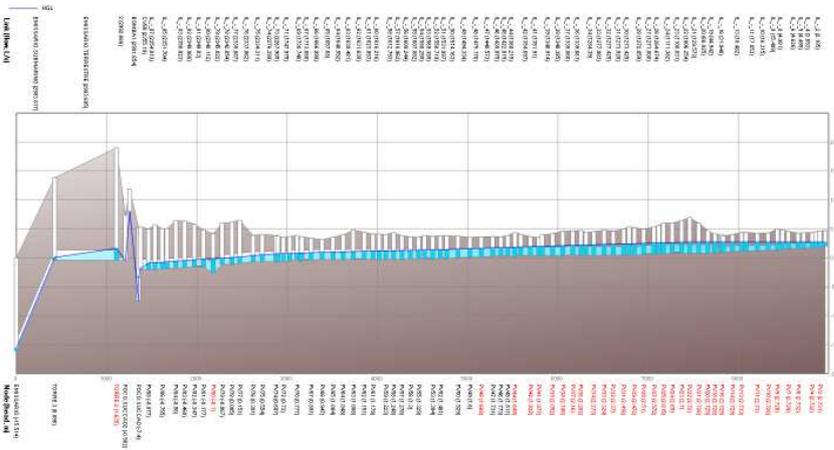
Figura 26 – Simulação para diferentes valores de R



(a) R=1%



(b) R=0,5%



(c) R=0,1%

Fonte: elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo empregou técnicas avançadas de modelagem hidrológica-hidráulica, propondo uma metodologia para simulação e otimização da rede coletora de esgoto integrada a rede de drenagem pluvial na bacia Vertente Marítima de Fortaleza. Esse processo envolveu etapas cruciais de parametrização, calibração e validação do modelo, visando reproduzir com precisão o comportamento hidráulico da rede. Por intermédio desta pesquisa, conclui-se que:

- O PCSWMM, modelo computacional selecionado, mostrou-se efetivo para a realização das simulações hidrológicas e hidráulicas, integrando facilmente os arquivos *shapefile*, sua interface é simplificada e intuitiva, facilidade na identificação de pontos de extravasamento, além de permitir a comparação entre cenários diferentes;
- A determinação da entrada de água pluvial nos sistemas de esgotamento sanitário é extremamente complexa por depender de inúmeros fatores. A metodologia RTK facilita o processo ao fazer a relação da vazão do sistema com as chuvas na localidade. O ideal é que se tenham dados de vazão medidos no período seco e no período chuvoso para mensurar os valores de R, T e K mais próximos da realidade.
- Dentre os cenários analisados, o mais eficaz foi aquele com duas sub-bacias, apresentando uma correspondência mais precisa em relação às medições reais de extravasamento, e na variação do nível nos PVs ao longo de todo o IL. Neste cenário, foram utilizados valores de R iguais a 0,01, que estão dentro dos parâmetros considerados aceitáveis na literatura;
- Os cenários pessimistas, com R acima de 2%, apresentaram grandes variações de extravasamento ao longo de todo IL, quanto maior o número de sub-bacias, menor era a sensibilidade do parâmetro R, devido o aumento da área de drenagem;
- O Tr é fundamental na engenharia hidrológica para prever eventos extremos e avaliar a capacidade dos sistemas de esgoto. As simulações para Tr de 2, 5 e 10 anos para duas sub-bacias mostraram um aumento significativo no volume de água. O valor de R igual a 0,01 demonstrou melhor desempenho, melhorando a capacidade do sistema de lidar com chuvas intensas e reduzindo extravasamentos;
- Embora os resultados das simulações tenham demonstrado um nível satisfatório de acurácia, é possível reconhecer que sempre há espaço para aprimoramentos e refinamentos. A inclusão de variáveis adicionais, como dados do lençol freático e influências das marés, bem como a consideração de outros fatores ambientais e operacionais, pode contribuir significativamente para aprimorar ainda mais a confiabilidade e a utilidade das simulações.

Portanto, é crucial ressaltar que os resultados das simulações são ferramentas valiosas para orientar a tomada de decisões no planejamento e na gestão de sistemas de esgoto. Ao fornecer uma visão abrangente do desempenho do sistema em diferentes condições e cenários, essas simulações podem ajudar os gestores a identificar áreas de melhoria, antecipar problemas potenciais e otimizar o uso dos recursos disponíveis.

Essas descobertas destacam a complexidade e a importância de considerar uma variedade de fatores e cenários ao desenvolver e calibrar modelos hidrológicos para sistemas de esgoto. A precisão e a confiabilidade desses modelos dependem não apenas da precisão dos dados e dos parâmetros utilizados, mas também da capacidade do modelo de capturar e representar adequadamente a complexidade e as interações do sistema real.

5.1 Recomendações

- Comparar os resultados da modelagem com medições reais obtidas nos PVs para validar a acurácia dos modelos simulados. Coletar dados abrangentes de campo, incluindo níveis de água, vazões e parâmetros de qualidade, para garantir uma comparação robusta e confiável;
- Utilizar algoritmos heurísticos avançados, como algoritmos genéticos ou de enxame de abelhas, para otimizar os valores de RTK usando o coeficiente de *Runoff*, tempo de concentração, e coeficiente de armazenamento. Ajustar esses parâmetros com base em simulações para melhorar a precisão da modelagem e a eficiência do sistema de drenagem;
- Realizar simulações de RTK considerando cenários de médio e longo prazo, levando em conta mudanças climáticas, expansão urbana e possíveis alterações nos padrões de precipitação. Avaliar a resiliência do sistema de esgotamento sanitário a diferentes condições futuras e propor medidas de adaptação para garantir a sustentabilidade do sistema;
- Realizar uma análise detalhada da qualidade da água, focando nos parâmetros bacteriológicos, como coliformes totais e *Escherichia coli*, para avaliar a contaminação e riscos à saúde pública. Utilizar métodos avançados de detecção e análise para garantir a precisão dos resultados e identificar fontes potenciais de contaminação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **A Questão da Água no Nordeste**. 2012. Disponível em: <<https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/669/4/A%20quest%C3%A3o%20da%20%C3%A1gua%20no%20Nordeste.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2024.
- AKHTER, M. S.; HEWA, G. A. The use of pcswmm for assessing the impacts of land use changes on hydrological responses and performance of wsud in managing the impacts at myponga catchment, south australia. **Water**, MDPI, v. 8, n. 11, p. 511, 2016.
- ANCHIETA, F. A. S. **Modelagem da influência da drenagem das águas pluviais da bacia do riacho Maceió no macrossistema de esgotamento sanitário de Fortaleza, Ceará**. 66 p. Monografia — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- ARASHIRO, P. K. D. Ii-271—uso de modelo hidráulico para simular as condições operacionais do sistema de interceptação de esgoto da região metropolitana de são paulo. Congresso ABES/Fenasan, 2017.
- ARAÚJO, J. W. O. **Modelagem da influência da infiltração de águas pluviais em um trecho do interceptor leste de esgoto da zona costeira de Fortaleza, Ceará**. 57 p. Monografia — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Nbr 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Nbr 14486: Sistemas enterrados para condução de esgoto sanitário - projeto de redes coletoras com tubos de pvc. Rio de Janeiro, 2000.
- BARBOSA, F. d. A. d. R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape, PB**. Tese (Doutorado), 2006.
- BENNETT, D. **Using flow prediction technologies to control sanitary sewer overflows: project 97-CTS-8**. [S.l.]: Water Environment Research Foundation, 1999. 197 p.
- BENTLEY STORMCAD CONNECT EDITION HELP. **Creating an RTK Table and Assigning it to a Catchment**. 2024. Disponível em: <<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20StormCAD%20SS5-v1/en/GUID-F063D1B4A4CE435E99209429CB5D99CB.html>>. Acesso em: 28 jan. 2024.
- BORGES, M. C. P. **Estudo para implantação de técnicas de drenagem sustentável na Região Administrativa Guarará II do Distrito Federal**. 98 p. Monografia — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>>.
- BUTLER, D.; DIGMAN, C. J.; MAKROPOULOS, C.; DAVIES, J. W. **Urban drainage**. [S.l.]: Crc Press, 2018.

CABRAL, J.; MASCARENHAS, F.; CASTRO, M. d.; MIGUEZ, M.; PEPLAU, G.; BEZERRA, A. Modelos computacionais para drenagem urbana. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES)**, p. 112–148, 2009.

CAMPOS, J. N.; RABELO, U. P.; NETO, I. E. L. The bell-shaped unit hydrograph for overland planes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 146, n. 5, p. 06020001, 2020.

CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. [S.l.]: Oficina de textos, 2015.

CDM SMITH. **Regional Hydraulic Model and Other Consent Order Requirements**. 2016. Disponível em: <https://www.hrsd.com/sites/default/files/assets/Documents/pdfs/iwd_regs/FederalFacility10YearPeakFlowDetermination.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2024.

CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 7, p. 501–504, 2003.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. d. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, SciELO Public Health, v. 43, p. 94–108, 2020.

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ. **Governo do Ceará, Cagece e Ambiental Ceará firmam parceria para capacitar mulheres na área do saneamento**. 2024. Disponível em: <<https://www.cagece.com.br/comunicacao/noticias/governo-do-estado-cagece-e-ambiental-ceara-firmam-parceria-para-capacitar-mulheres-na-area-do-saneamento/>>. Acesso em: 14 jul. 2024.

COMPUTATIONAL HYDRAULICS INTERNATIONAL (CHI). **Manual do PCSWMM**. 2024. Disponível em: <<https://support.chiwater.com/77618/why-choose-pcswmm>>. Acesso em: 11 mar. 2024.

COSTA, B. V. *et al.* **Sistema de esgotamento sanitário: estudo de caso: Treviso/SC**. 98 p. Monografia — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

COSTA, M. E. L. **Monitoramento e modelagem de águas de drenagem urbana na bacia do Lago Paranoá**. 203 p. Dissertação — Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CÂNDIDO, J. R. S. **Modelação Dinâmica de Sistemas de Drenagem em Meio Urbano**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Nova de Lisboa, 2013.

EDDY, M. ; TCHOBANOGLIOUS, G. **Ingeniería sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales**. [S.l.]: Labor, 1985. 969 p.

FERNANDES, L. B. **Modelagem Hidráulica do Interceptor Leste de Fortaleza utilizando o SWMM**. 91 p. Monografia — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

FERREIRA, P. C. M. **Modelação Dinâmica de Sistemas de Drenagem Urbana. Aplicação a um caso de estudo**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2014.

FESTI, A. V. Águas de chuva na rede de esgoto sanitário—suas origens, interferências e consequências. In: **23o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental-ABES, Campo Grande/MS**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 16.

FESTI, A. V. **Estimativa da infiltração e do afluxo devidos à precipitação na rede de esgoto sanitário em município de pequeno porte**. 97 p. Dissertação (Mestrado), 2006.

FORMIGA, K. T. M.; CARVALHO, M. d.; SILVA, K. A.; SOARES, A. K. Calibração do storm water management model (swmm) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 21, p. 697–707, 2016.

FUSCO, W.; OJIMA, R. **Censo Demográfico 2022: reflexões iniciais sobre a região Nordeste**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/fundaj/pt-br/composicao/dipes-1/publicacoes/relatorios-de-pesquisas/censo-demografico-2022-reflexoes-iniciais-sobre-a-regiao-nordeste.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2024.

GHEITH, H. A detailed procedure for separating rdii stages and generating a single set of rtk hydrographs for continuous simulation. **Journal of Water Management Modeling**, Computational Hydraulics Int.(CHI), 2011.

GIRONÁS, J.; ROESNER, L. A.; DAVIS, J.; ROSSMAN, L. A.; SUPPLY, W. **Storm water management model applications manual**. [S.l.]: Citeseer, 2009.

IBGE, D. d. G. Atlas de saneamento, 2011. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2022**. 2022a. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>. Acesso em: 05 mai. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico do Ceará em 2022**. 2022b. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/panorama>>. Acesso em: 05 mai. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Municipal de Fortaleza**. 2018. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Fortaleza_2017.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normal Climatológica do Brasil 1991-2020**. 2020. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 21 jan. 2024.

IRVINE, K.; CHUA, L. Modeling stormwater runoff from an urban park, singapore using pcswwm. **Journal of Water Management Modeling**, Computational Hydraulics Int.(CHI), 2016.

IRVINE, K. N.; CHUA, L. H.; ASHRAFI, M.; LOC, H. H. *et al.* Drivers of model uncertainty for urban runoff in a tropical climate: The effect of rainfall variability and subcatchment parameterization. **Journal of Water Management Modeling**, 2023.

KIM, J.; LEE, J.; OH, J. Comparisons of rdii predictions using the rtk-based and regression methods. **Journal of Korean Society of Water and Wastewater**, The Korean Society of Water and Wastewater, v. 30, n. 2, p. 179–185, 2016.

KOUTSOYIANNIS, D.; KOZONIS, D.; MANETAS, A. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 206, n. 1-2, p. 118–135, 1998.

- LUCAS, A. H.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R. B.; BARBASSA, A. P. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia sanitária e ambiental**, SciELO Brasil, v. 20, p. 17–28, 2015.
- MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H.; MARQUES, A.; RAMINHOS, C. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Rem: Revista Escola de Minas**, SciELO Brasil, v. 60, p. 525–536, 2007.
- MATOS, J. S. Ambiente e saneamento: Sistemas de drenagem urbana. **Provisional version**, 2006.
- MAYS, L. W. **Water resources engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. 781 p.
- MEDEIROS, A. T.; DORNELLES, F. Efeitos da intrusão de águas pluviais em um sistema de tratamento de esgoto. **Encontro Nacional de Águas Urbanas (14.: 2022: Brasília, DF), Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos (4.: 2022: Brasília, DF). Anais [recurso eletrônico]. [Porto Alegre: ABRHidro, 2022]**, 2022.
- MENDES, A. T. Dispositivos de drenagem urbana de baixo impacto para diminuição da vazão no sistema de microdrenagem da bacia urbana do córrego brejo comprido, palmas-to. Universidade Federal do Tocantins, 2019.
- MESQUITA, J. B. d. F.; NETO, I. E. L. Coupling hydrological and hydrodynamic models for assessing the impact of water pollution on lake evaporation. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 20, p. 13465, 2022.
- MESQUITA, J. B. F. **Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na Vertente Marítima de Fortaleza, Ceará**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/30536/5/2018_dis_jb_fmesquita.pdf>.
- MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E.; MILDE, L. C.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 61–70, 2003.
- MUTTI, P. R. Avaliação dos princípios da adoção de sistemas de esgotamento sanitário do tipo separador absoluto ou unitário em áreas urbanas de clima tropical. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. d. A. **Hidrologia estatística**. [S.l.]: CPRM, 2007. 552 p.
- NETTO, J. A.; FERNANDEZ, M. Fernandez y. Araújo (1998). **Manual de Hidráulica**, 1998.
- NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.
- PEREIRA, S. P.; FERNANDES, L. B.; FILHO, F. d. A. d. S.; NETO, I. E. L. Modelagem do macrossistema de coleta de esgotos de fortaleza-ce. *Revista DAE*, 2021.
- PINHEIRO, F. A. P.; SAVOIA, J.; ANGELO, C. Análise comparativa da atuação de prestadores de serviços de saneamento públicos e privados no brasil. **CEP**, v. 5713, p. 430, 2016.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. [S.l.]: Editora Blucher, 1976.

PREFEITURA DE FORTALEZA. **DRENAGEM E MANEJO DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS DO MUNICÍPIO DE FORTALEZA**. 2015a. Disponível em: <https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/images/urbanismo-e-meio-ambiente/infocidade/plano_municipal_de_drenagem.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2024.

PREFEITURA DE FORTALEZA. **A organização e a estrutura administrativa do poder executivo municipal**. 2021. Disponível em: <https://planejamento.fortaleza.ce.gov.br/images/PDF/2023/LEGISLACAO/2021_LC_N%C2%BA_307_2021_ALTERA_DISPOSITIVOS_D_A_LC_N%C2%BA_176_2014.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2024.

PREFEITURA DE FORTALEZA. **Fortaleza tem o maior PIB do Nordeste e o 11º maior do Brasil**. 2022. Disponível em: <<https://www.seplag.ce.gov.br/2022/12/16/fortaleza-detem-maior-fatia-do-pib-estadual/>>. Acesso em: 16 ago. 2024.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA/SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO E MEIO AMBIENTE. **Perfil Municipal de Fortaleza**. 2015b. Disponível em: <https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/images/urbanismo-e-meio-ambiente/infocidade/plano_municipal_de_drenagem.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2024.

RIGHETTO, A. M. Manejo de águas pluviais urbanas. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, p. 112–148, 2009.

RODRIGUES, L. A. A. *et al.* **Impacto do processo de urbanização na formação de enchentes e alagamentos em Belo Horizonte, MG**. 67 p. Monografia (Especialização) — Universidade Federal de Minas Gerais, Fortaleza, 2020.

ROSSMAN, L. A. *et al.* **Storm water management model user's manual, version 5.0**. [S.l.]: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and . . . , 2010. 352 p.

SABOIA, A. D. R. **Modelagem Hidráulica do Interceptor Oeste da Cidade de Fortaleza/CE**. 44 p. Monografia — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SANTOS, L. C. d. A. *et al.* Modelagem hidrológica de três bacias hidrográficas do alto e médio pajeú, estado de pernambuco. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2023.

SCHUSTER, R. C. **Desenvolvimento de um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão e propagação de vazão em reservatórios**. Porto Alegre: [s.n.], 2014.

SHINMA, T. A. **Calibração Multiobjetivo do SWMM Aplicada à Transformação Chuva-Vazão**. 2011. 136 f. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)—Escola de . . . , 2011.

SILVA, F. O. E. d.; JÚNIOR, F. F. R. P.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para fortaleza-ce com dados do pluviógrafo da ufc. Revista DAE, 2013.

SILVA, M. A. B. d.; SILVA, S. R. d.; CABRAL, J. J. d. S. P. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in recife-pe. **RBRH**, SciELO Brasil, v. 22, 2017.

SILVA, W. M. P.; FARIAS, M. D. O.; CIRILO, S. D. T. M. B. and J. A.; JUNIOR, J. F. D. C. Identificação de Áreas vulneráveis Às enchentes e inundações e práticas sustentáveis na cidade de caruaru - pe. XV SRHNE - SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2020.

SILVEIRA, A. L. L. d. Fator de pico para hidrogramas unitários sintéticos triangulares. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, SciELO Brasil, v. 21, p. 46–52, 2016.

SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de formulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 5–23, 2005.

SOUZA, V. C. B. de. Gestão da drenagem urbana no brasil: desafios para a sustentabilidade. **Revista eletrônica de gestão e tecnologias ambientais**, v. 1, n. 1, p. 58–72, 2013.

SPERLING, M. V. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG Belo Horizonte, v. 3, p. 452, 2005.

STANTEC. **Waterloo Sanitary Master Plan**. 2015. Disponível em: <<https://www.waterloo.ca/en/government/resources/Documents/Cityadministration/SanitaryMasterPlan/Sanitary-Master-Plan---PDF-version.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2024.

STANTEC. **Generating Wet Weather Flows Using RTK**. 2021. Disponível em: <https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=4710>. Acesso em: 28 jan. 2024.

TSUTIYA, M. T.; SOBRINHO, P. A. Coleta de transporte de esgoto sanitário. 1999.

TUCCI, C. E. **Modelos hidrológicos**. [S.l.]: UFRGS/Associação Brasileira de recursos Hídricos, 1998.

TUCCI, C. E. Hidrologia: Ciência e aplicação. 4ª edição. ed. **Porto Alegre: Editora da UFRGS**, v. 4, 2012.

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Urban hydrology for small watersheds**. [S.l.]: Technical release, 1986. 2–6 p.

VERGOLINO, J. R.; DANTAS, M. Os determinantes do processo de urbanização da região nordeste do brasil: 1970-1996. **Revista de Economia**, v. 31, n. 2, 2005.

VINAGRE, M. V. d. A.; LIMA, A. C. d. M.; JUNIOR, D. L. d. L. Estudo do comportamento hidráulico da bacia do paracuri em belém (pa) utilizando o programa storm water management model. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 20, p. 361–368, 2015.

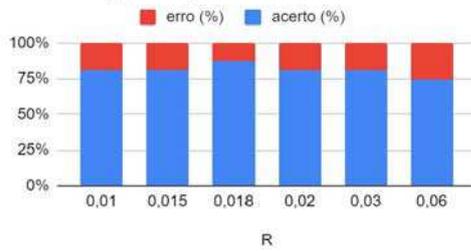
WALSK, T. **RTK For RDII**. 2021. Disponível em: <<https://blog.bentley.com/software/rtk-for-rdii/>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Sanitary Sewer Flow Monitoring and Data Analytics**. 2019. Disponível em: <<https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-downloads-library/public/03---resources/wsec-2019-fs-011---csc---flow-monitoring-and-data-analytics---final.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

ANEXO A – SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE R PARA DIFERENTES SUB-BACIAS

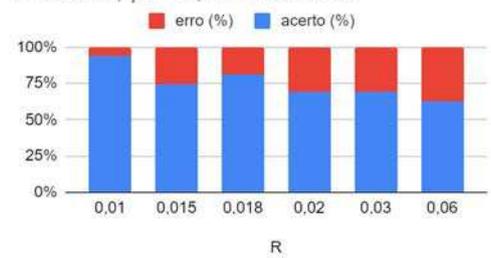
Figura 27 – Cenários de simulação de R para 2 sub-bacias

2 bacias, pv 15, emil



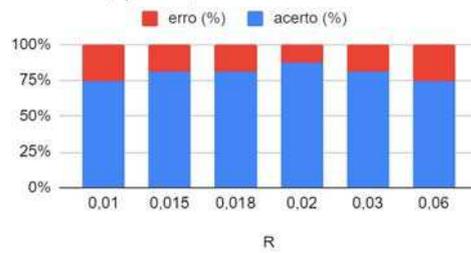
(a) PV15 Emil

2 bacias, pv 15, tereza hinko



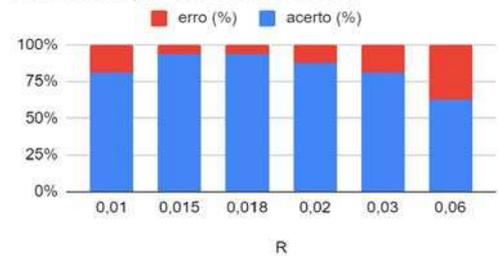
(b) PV15 Tereza Hinko

2 bacias, pv 41, emil



(c) PV41 Emil

2 bacias, pv 41, tereza hinko

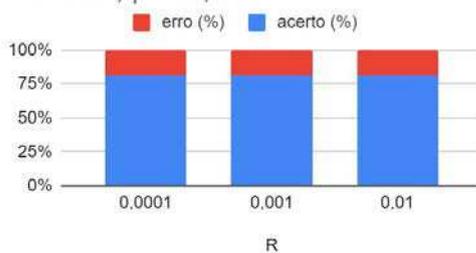


(d) PV41 Tereza Hinko

Fonte: elaborado pelo autor.

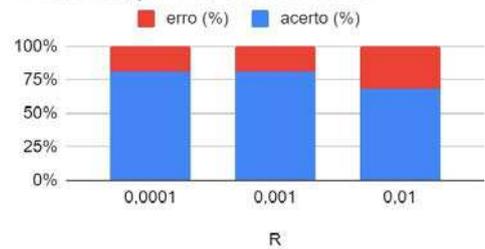
Figura 28 – Cenários de simulação de R para 4 sub-bacias

4 bacias, pv 15, emil



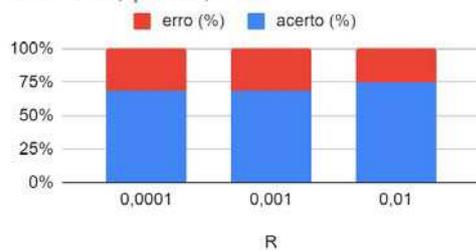
(a) PV15 Emil

4 bacias, pv 15, tereza hinko



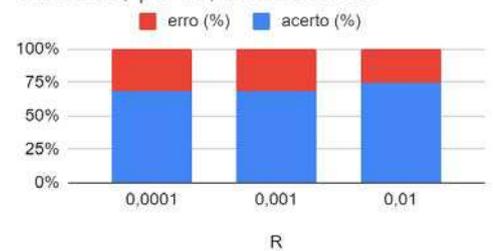
(b) PV15 Tereza Hinko

4 bacias, pv 41, emil



(c) PV41 Emil

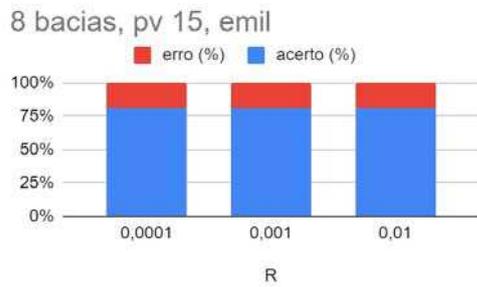
4 bacias, pv 41, tereza hinko



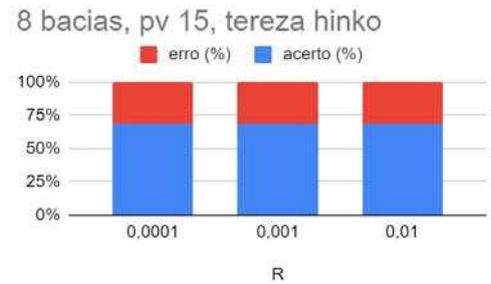
(d) PV41 Tereza Hinko

Fonte: elaborado pelo autor.

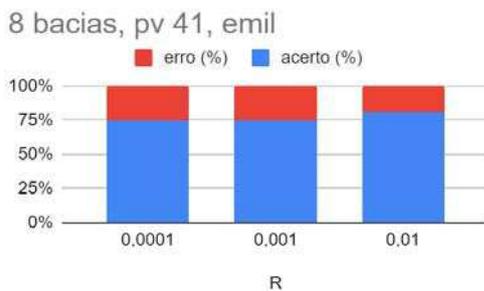
Figura 29 – Cenários de simulação de R para 8 sub-bacias



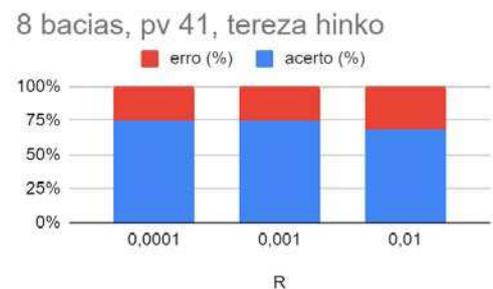
(a) PV15 Emil



(b) PV15 Tereza Hinko



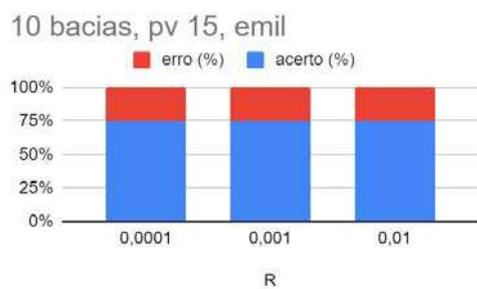
(c) PV41 Emil



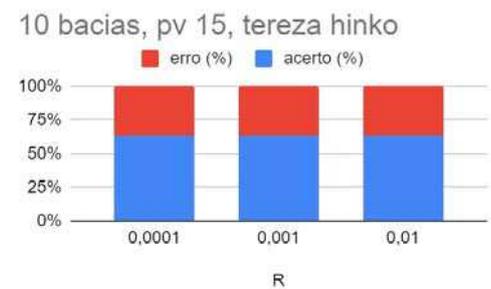
(d) PV41 Tereza Hinko

Fonte: elaborado pelo autor.

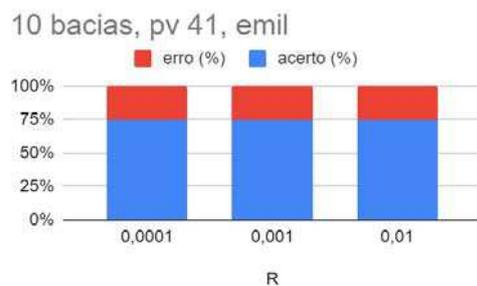
Figura 30 – Cenários de simulação de R para 10 sub-bacias



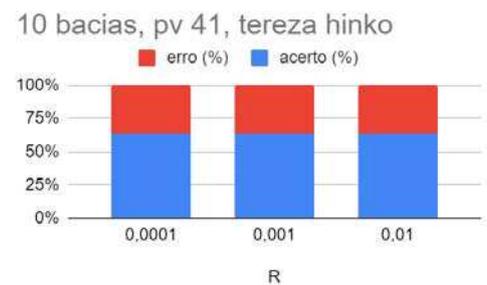
(a) PV15 Emil



(b) PV15 Tereza Hinko



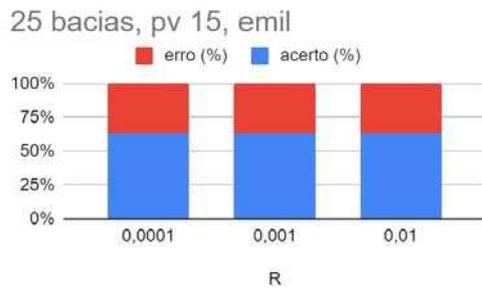
(c) PV41 Emil



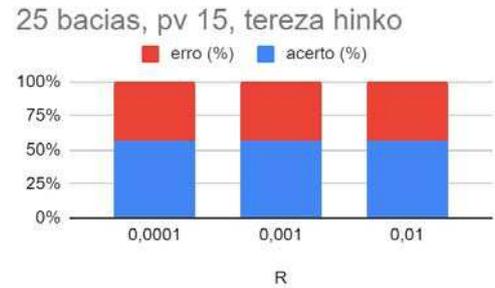
(d) PV41 Tereza Hinko

Fonte: elaborado pelo autor.

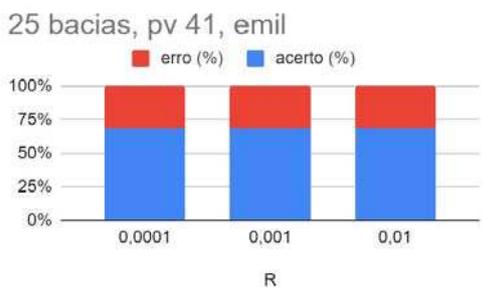
Figura 31 – Cenários de simulação de R para 25 sub-bacias



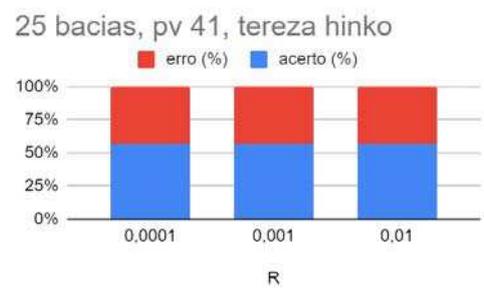
(a) PV15 Emil



(b) PV15 Tereza Hinko



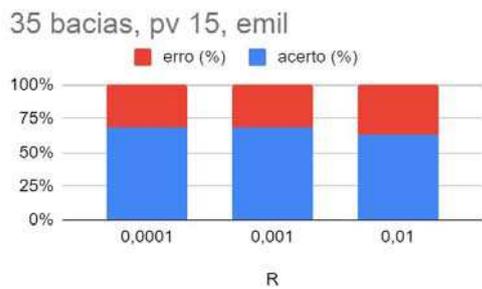
(c) PV41 Emil



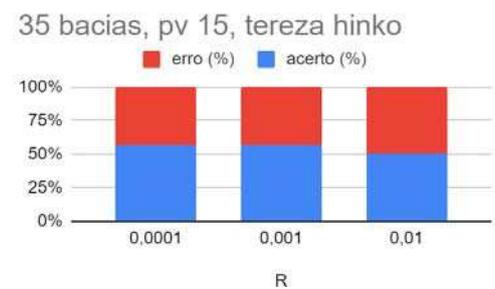
(d) PV41 Tereza Hinko

Fonte: elaborado pelo autor.

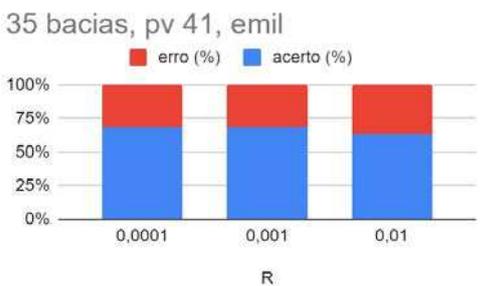
Figura 32 – Cenários de simulação de R para 35 sub-bacias



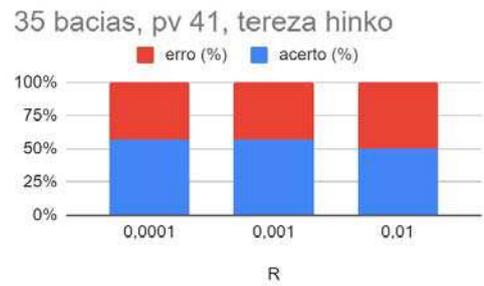
(a) PV15 Emil



(b) PV15 Tereza Hinko



(c) PV41 Emil



(d) PV41 Tereza Hinko

Fonte: elaborado pelo autor.