PROPOSTA DE METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO INTEGRADA DAS REDES URBANAS DE DRENAGEM PLUVIAL E ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Rio de Janeiro

Dezembro de 2022

PROPOSTA DE METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO INTEGRADA DAS REDES URBANAS DE DRENAGEM PLUVIAL E ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Aprovada por: Prof. Marcelo Gomes Miguez

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento

Prof. Marcelo de Miranda Reis

Prof. José Paulo Soares Azevedo

Prof. Paulo Canedo de Magalhães

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2022

Oliveira, Antonio Krishnamurti Beleño de

Proposta de metodologia de simulação integrada das redes urbanas de drenagem pluvial e esgotamento sanitário / Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XXV, 250p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2022.

Referências Bibliográficas: p.235-250.

1. Gestão de Águas Urbanas. 2. Manejo de Águas Pluviais. 3. Esgotamento Sanitário. I. Miguez, Marcelo Gomes. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À minha avó Leonídia Maria que hoje me observa do céu.
Não há uma ação em minha vida que não tenha um dedo seu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Maria pela sua interseção nos momentos mais difíceis da minha caminhada.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional e por toda a base e os valores que me foram passados, com destaque para a valorização da educação, o respeito ao próximo e a importância do amor. Agradeço ao meu pai Antonio pelo seu exemplo de disciplina e dedicação, à minha mãe Cora pelo seu afeto e humanidade, ao meu irmão João pelo companheirismo, ao meu irmão José pela parceria, à minha irmã Cora pela inspiração, à minha sobrinha Luna pelo simples fato de existir e iluminar este mundo com a sua doçura e à minha cunhada Iasmim pelo exemplo de persistência e garra.

Agradeço à minha companheira, namorada e futura esposa Amanda Medeiros por sempre acreditar em mim, mesmo nos momentos em que eu não consegui. Agradeço por me colocar para cima em meus momentos mais difíceis e pela sua leveza, que só tem quem tem certeza de que no final tudo dá certo. Obrigado pela sua fé que emana de seu ser, e contagia, inspira e move. Obrigado por todo seu amor e dedicação, sempre darei o melhor de mim para poder retribuir. Obrigado também ao Fifi.

Agradeço especialmente à minha avó Leonidia que nos deixou recentemente. Mulher forte, correta, inteligente, resiliente e amorosa, qualidades que mantinha com o equilíbrio de quem consegue chamar a atenção e ensinar, ao mesmo tempo que inspira e acalma. Muito do que sou devo à senhora.

Agradeço à Jiddu Krishnamurti por todos os ensinamentos deixados, que sorte tenho de carregar seu nome. Agradeço aos ensinamentos de Paulo Freire, cujas obras têm se tornado minha fonte de inspiração na forma de tratar a academia e a docência.

Agradeço ao meu amigo e orientador Marcelo Miguez. Obrigado por todos os ensinamentos. Obrigado pela paciência e por todos os conselhos, sejam eles profissionais ou pessoais. Obrigado por ter aberto as portas de minha segunda casa cerca de 10 anos atrás. Obrigado por toda a confiança depositada em mim e pela sua exigência que consegue tirar o melhor de nós, melhor que nem mesmo nós sabíamos existir. Obrigado também pelos momentos de descontração nos projetos de extensão, foram fundamentais.

Tive a sorte de ser orientado não só pelo professor Marcelo Miguez, mas por demais profissionais que hoje posso também chamar de amigos.

Obrigado Osvaldo Rezende, meu primeiro orientador. Obrigado por toda a parceria, amizade e confiança. Essa vida ainda nos reserva muitas parcerias, meu irmão, tenho certeza.

Obrigado Matheus Martins, meu orientador não oficial e amigo, por toda a inspiração. Obrigado pelas conversas e ensinamentos, passando pela hidráulica e hidrologia, e chegando à política e ao cinema.

Um agradecimento especial ao professor e amigo Paulo Canedo. Profissionalmente não seria surpresa que o professor Canedo seria uma fonte de ensinamentos e inspiração, visto seu excelente currículo e contribuições para a engenharia hidráulica. Porém, há coisas que não constam no Lattes. Tive a sorte de ser orientado por um grande ser humano, que além do carisma esbanja simplicidade, compaixão e fraternidade.

Um agradecimento mais que especial ao professor Marcos Von Sperling, cuja literatura, didática e inclusiva, a respeito dos estudos de modelagem da qualidade da água, permitiu o desenvolvimento de etapas importantes da metodologia aqui proposta.

Obrigado ao amigo, e irmão por escolha, de todas as horas Luiz Henrique. Sua parceria é de longa data e tem parcela importante no meu sucesso profissional e pessoal.

Ao meu amigo e irmão Erimar Pontes que merece duas páginas nos meus agradecimentos. A primeira só pelas nossas histórias e aventuras vividas, e a segunda por todo seu apoio profissional no que diz respeito ao sistema de esgotamento sanitário. Para não expor nossa intimidade e os seus segredos profissionais, o agradecimento se limitará a essas 4 linhas.

Obrigado ao meu amigo Alex Duarte e à minha amiga Ana Camacho. Mesmo à distância sei que vocês torcem por mim, e eu reciprocamente tenho os melhores desejos para vocês.

À minha parceira Ianic que mesmo à distância, principalmente desde o início da pandemia, continuou presente em minha vida, seja nas escolhas em relação aos cenários de projeto, valorizando a paisagem, seja pelos recados deixados no mural do laboratório, ou seja pela sua caneca que sigo usando para tomar café.

Obrigado a Rodrigo Hoerner por todo seu apoio técnico no desenvolvimento deste trabalho. Você é uma excelente pessoa e aprendi muito com você.

Obrigado à minha amiga Caroline Souto que ajudou a carregar o peso do desenvolvimento de um trabalho não convencional no tratamento das águas urbanas. Obrigado por aceitar esta empreitada, tenho certeza de que seu TCC será excelente.

Obrigado a Larissa Turini por participar das discussões sobre os assuntos envolvidos nesta tese. Obrigado também pela amizade inesperada.

Um obrigado e um salve para meu amigo Francis Martins. Amizades como a sua fazem o mundo melhor, mais leve.

Obrigado ao parceiro e orientado Wallace Ramos que desenvolveu com maestria o projeto de microdrenagem que serviu de base para o desenvolvimento dos estudos aqui expostos.

Obrigado Bruno Tabet por ter participado desde o início do desenvolvimento desta linha de pesquisa. Um agradecimento especial aos demais alunos que fizeram parte da pesquisa de tratamento integrado dos sistemas de drenagem e esgoto, Karolline Dias, Marcella Simões, Douglas Lyrio e Caio Gabriel.

Um agradecimento ao meu amigo e parceiro profissional João Paulo Fraga que também está envolvido desde o início desta linha de pesquisa. Espero ter muitas parcerias futuras com você e que ainda sobre um tempo para a gente comemorar a vida.

Agradeço à minha amiga Carolina Lopes que esteve junto nesta caminhada, estando presente nos momentos bons e ruins. Obrigado por todas as conversas e frases de incentivo. A vida te reserva coisas maravilhosas, tenho certeza.

Agradeço ao parceiro Lucas Alves, por aceitar embarcar em várias empreitadas, prometo que os próximos convites serão para coisas mais leves. No final do capítulo 4 você encontrará um projeto multifuncional baseado na natureza para mitigar os problemas das águas urbanas, pode lê-lo como cenário vegano.

Obrigado a todos os outros amigos ou familiares que somaram em minha trajetória e têm, mesmo que indiretamente, papel fundamental em todas as minhas realizações e

conquistas. Mesmo que o tempo, a cidade, ou as escolhas tenham nos afastado, vocês são importantes.

Um agradecimento mais que especial ao Laboratório de Hidráulica computacional, minha segunda casa, e a todos que passaram por lá e foram fundamentais na minha trajetória. Agradeço à Aline Verol, Bruna Battemarco, Fernanda Thomaz, Luciana Guimarães, Dearley Brito, Virgílio Noronha, Anna Franco, Victor Souza, Laurent Feu, Rafael Pinto, Lilian Yamamoto, Bia Amback, Cícero Arrais, Hudson Neto, Lais Brilhante, Luccas Tolentino, Paula Canedo, Ronan Oliveira e Celí Okumura. Uma infinidade de nomes pode ser listada desta família e peço desculpas se, pela minha falta de memória, esqueci de alguém.

Á minha amiga Caroline Pitzer um especial agradecimento pela sua parceria de todas as horas, especialmente da madrugada. Você é diferenciada, sócia, do ponto de vista profissional, mas principalmente da sua alma.

Obrigado a minha amiga e companheira profissional Luiza Batista. Fico sempre na expectativa de receber seu podcast semanal para podermos desenvolver, com maestria, nossos trabalhos.

Um agradecimento especial à Maria Luisa Lado e à Myrian Portes. Tive muita sorte de poder contar com vocês. O apoio de vocês foi muito mais fundamental do que vocês possam imaginar.

Um agradecimento especial à Universidade Federal Fluminense, especialmente ao Campus de Volta Redonda, onde tive o prazer de exercer a docência pela primeira vez. Obrigado aos professores do departamento de Engenharia Mecânica em especial ao professor Duran, Alexandre Francisco e Fábio Brum pela recepção. Agradeço a todos os funcionários em especial à Fabrícia Oliveira. Obrigado a todos os alunos de Mecânica dos Fluidos e Sistemas Pneumáticos e Oleodinâmicos.

Um agradecimento especial à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, ainda mais especialmente ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Um agradecimento especial aos professores Flávio Silva, Daniel Cardoso, José Araruna e Fernanda Salgado pelo acolhimento e confiança depositada. Um agradecimento especial

ao Escritório Modelo de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio, e aos alunos Pâmela Paula, Bruna Vallejos, Victória Reis, Amanda Wirz, Marcelo Smith, Vivianne Dornellas, Fernando Coelho, David Castro, Alana Pimentel e Luiza Klippel por terem sido importantes na minha trajetória profissional e acadêmica. Além disso, um agradecimento especial a José Nilson e à Ana Carolina Fonseca pelo acolhimento.

Agradeço a todos os pesquisadores e profissionais da ciência e saúde. Passamos por um momento assustador no período que coincidiu com o desenvolvimento desta tese. O que seria deste trabalho, ou de qualquer outro, sem a vacina, sem a saúde, e sem a segurança e tranquilidade do ir e vir, sem a vida?

Ao Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ por ter me dado a oportunidade do meu desenvolvimento técnico-científico desde meu mestrado. Obrigado aos professores e aos funcionários que mantêm a excelência do programa.

Obrigado ao ensino público brasileiro que sempre esteve presente em minha trajetória no país. Obrigado aos professores e funcionários do colégio municipal Delfim Moreira cujo ensino abriu minhas portas no Brasil. Obrigado aos professores e funcionários do Colégio Pedro II, onde além de ter tido um ensino de excelência, passei momentos muito felizes que carrego para sempre no coração. Obrigado especial à Universidade Federal do Rio de Janeiro, professores e todos os funcionários, da qual faço parte há mais de 10 anos e é peça estruturante do meu ser.

Agradecimento ao apoio fundamental do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que com o auxílio financeiro prestado viabilizou o presente estudo. A ciência muda o mundo.

Agradecimentos especiais para a Cátedra UNESCO de Drenagem Urbana em Regiões de Baixada Costeira da Universidade Federal do Rio de Janeiro, da qual orgulhosamente faço parte.

Aos membros da banca avaliadora, os Professores Marcelo de Miranda Reis, Nilo de Oliveira Nascimento, José Paulo Soares Azevedo e Paulo Canedo Magalhães, meu sincero agradecimento pela disponibilidade e pelas contribuições ao meu trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

PROPOSTA DE METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO INTEGRADA DAS REDES URBANAS DE DRENAGEM PLUVIAL E ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Dezembro/2022

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Programa: Engenharia Civil

No Brasil, o sistema de esgotamento sanitário adotado é o de separação absoluta, em que águas pluviais e esgoto sanitário são conduzidos separadamente em redes dedicadas. Porém, no país, esse sistema não demonstra a funcionalidade esperada em projeto, tendo em vista as inúmeras contribuições indevidas entre os sistemas, sendo comum que haja ligações clandestinas de esgoto nas redes de águas pluviais, assim como o caso contrário, caracterizando um sistema misto disfuncional. Vale destacar que a coleta do esgoto é fundamental para garantir condições sanitárias às habitações, mas seu lançamento *in natura*, sem tratamento, é ponto crucial nas questões de degradação ambiental. Assim, a necessidade de analisar o funcionamento conjunto das redes torna-se fundamental, para uma correta interpretação dos problemas apresentados, assim como também, cada vez mais são demandadas ferramentas que possibilitem um correto diagnóstico e prognóstico conjunto. Poucas ferramentas para simular e avaliar conjuntamente estes dois sistemas estão disponíveis para profissionais de municipalidades, empresas públicas ou da iniciativa privada. Dessa maneira, o presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de simulação integrada das redes urbanas de drenagem pluvial e esgotamento sanitário, para diversos casos reais de aplicação, considerando as interferências cruzadas entre os dois sistemas e o plano superficial urbano, usando como base o Modelo de Células de Escoamento, cuja aplicação é usualmente possível mesmo em cenários com deficiência e incompletude dos dados de entrada de simulação, já sendo utilizado na representação conjunta de redes de micro e macrodrenagem, interagindo com a bacia urbanizada.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A SIMULATION METHOD PROPOSAL FOR INTEGRATING URBAN STORM DRAINS AND SANITARY SEWER NETWORKS

Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

December/2022

Advisor: Marcelo Gomes Miguez

Department: Civil Engineering

The "Separate sewage system" is legally adopted in Brazil - sewage and stormwater flow in two separate systems. However, in this country, the separate sewers do not demonstrate the functionality foreseen in their project. There are many irregular crossed contributions between systems, characterizing a mixed dysfunctional system. It is worth mentioning that sewage collection is fundamental to guarantee the sanitary conditions of the residences, but its simple collection, without treatment, is the central factor for environmental degradation. Thus, the need to analyze the joint functioning of the two systems is crucial for the proper management of the presented problems. This way, mathematical tools that allow a correct and integrated diagnosis and prognosis are fundamental. However, few tools to jointly evaluate these two systems are available to municipal professionals or public and private companies. Therefore, the present work aims to propose an integrated simulation methodology of urban stormwater and sewage systems for several real cases considering the possible reciprocal interferences between systems. In this way, the present work aims the development for an integrated simulation methodology of the urban networks of rainwater drainage and sanitary sewage for several real application cases, considering the crossed interferences between the two systems and the urban plan, using the cell model quasi-2D, MODCEL.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Resumo do Estado da Arte 7

1.2 Motivação 8

1.3 Objetivos 9

1.3.1 Geral 9

1.3.2 Específicos 10

1.4 Principais contribuições da tese 10

1.5 Metodologia Geral 11

1.6 Organização da tese 12

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13

2.1 Histórico do saneamento básico no Brasil 13

2.2 Sistema de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas 18

2.2.1 Dimensionamento hidráulico do sistema de drenagem 20

2.2.2 Sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS) 23

2.2.3 Drenagem Urbana e os espaços livres 25

2.2.4 Falhas do Sistema de Drenagem e seus impactos 26

2.3 Sistema de Esgotamento Sanitário 30

2.3.1 Dimensionamento hidráulico do sistema de esgotamento separador absoluto 33

2.3.2 Sistema de esgotamento sanitário unitário 38

2.4 Qualidade das Águas Urbanas – Conceitos e Modelagem 48

2.5 Estado da Arte do Estudo Integrado das Redes Urbanas de Drenagem Pluvial e Esgotamento Sanitário 61

2.6 Soluções baseadas na natureza 67

2.7 Infraestrutura verde e azul 69

2.8 Water Sensitive Urban Design 69

2.9 Wetlands construídos 71

3 METODOLOGIA 75

3.1 ETAPA 1 – Diagnóstico conceitual do funcionamento dos sistemas de drenagem urbana e esgotamento sanitário, identificando possíveis problemas e avaliando, também, conceitualmente, a extensão das intervenções requeridas 83

3.2 ETAPA 2 - Desenvolvimento do MODCEL-SHIM 85

3.3 ETAPA 3 - Desenvolvimento do Modelagem de Qualidade Ambiental 93

3.4 ETAPA 4 - Proposições de soluções para os sistemas disfuncionais 97

3.4.1 Concepção de solução integrada para sistemas disfuncionais de drenagem recebendo águas de esgoto 98

3.4.2 Concepção de solução integrada para sistemas disfuncionais de esgoto recebendo águas de drenagem 100

4 AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DA METODOLOGIA 101

4.1 ETAPA 1 – Análise preliminar da Bacia Hidrográfica Piloto 101

4.1.1 Apresentação da bacia piloto 113

4.1.2 Estudos Hidrológicos.....128

4.2 ETAPA 2 – MODCEL-SHIM para a bacia piloto 131

4.2.1 Simulação do sistema de macrodrenagem.....132

4.2.2 Simulação do escoamento superficial.....137

4.2.3 Simulação do sistema de microdrenagem 144

4.2.4 Simulação de sistema de esgotamento sanitário.....162

4.2.5 Possíveis interações entre os sistemas 167

4.3 ETAPA 3 – Modelagem Ambiental para a bacia piloto 198

4.4 ETAPA 4 – Alternativas para mitigação das falhas na bacia piloto 206

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 215
5.1 Caso Real em Município do Norte do Brasil..... 215
5.1.1 ETAPA 1 – Município da Região Norte 215
5.1.2 ETAPA 2 – MODCEL-SHIM – Município da Região Norte 218
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....227
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 235

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema da Situação adequada das redes de drenagem e esgotamento sanitário. Fonte: Próprio autor 3
Figura 1-2. Esquema da Situação de Contribuição clandestina ou irregular entre as redes de esgotamento sanitário e de drenagem, esgoto na drenagem. Fonte: Próprio autor. 4
Figura 1-3. Esquema da Situação de Contribuição parasitária entre as redes de esgotamento sanitário e de drenagem, drenagem no esgoto. Fonte: Próprio autor. 5
Figura 2-1 – Nomenclatura base para as falhas no sistema de drenagem urbana. Fonte: Autor. 27
Figura 2-2. Fluxograma de identificação da situação do sistema de esgotamento. Fonte: Madeira (2012), adaptado de Bernardes; Soares (2004) 32
Figura 2-3. Esquema de sistema unitário com implementação de extravasores. Fonte: Orsini (2011) apud Madeira (2012) 41
Figura 2-4. Esquema de sistema unitário com implementação de extravasor e de reservatórios. Fonte: Orsini (2011) apud Madeira (2012) 42
Figura 2-5. Esquema de sistema unitário com tratamento em duas etapas. Fonte: Gehling e Benetti (2005) adaptado de Metcalf e Eddy, (1991) 42
Figura 2-6. Caixa ecológica para esgotos. Fonte: Madeira (2012), adaptado de Wittler (2012) 43
Figura 2-7. Esquema de estruturas e regulação e desvio. Fonte: Madeira (2012) adaptado de Tchobanoglous e Burton, (1991) 44
Figura 2-8. Extravasor em estação elevatória de esgoto sanitário. Fonte: Coppetec, 2018. 45
Figura 2-9. Exemplo de CTS GAP. Fonte: Coppetec, 2018. 45
Figura 2-10. Exemplo de CTS na Calha Fluvial. Fonte: Coppetec, 2018. 46
Figura 2-11. Exemplo de interceptor na calha fluvial. Fonte: Coppetec, 2018. 47
Figura 2-12. Impurezas que afetam a qualidade das águas. Fonte: Adaptado de Barnes *et al.* (1981). 49
Figura 2-13. Esquema dos principais fatores envolvidos nas mudanças dos constituintes. Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014) 56
Figura 2-14. Classificação dos wetlands construídos com destaque as modalidades mais recorrentes no Brasil. Fonte: PPGEA/UFSC, 2021, adaptado de Vymazal e Kroepfelová (2008). 72

Figura 2-15. Esquema representativo de um perfil longitudinal do wetlands construído de escoamento subsuperficial horizontal – WCH. Fonte: PPGEA/UFSC, 2021, adaptado de Acervo GESAD. 73
Figura 2-16. Esquema representativo de um perfil vertical do wetland construído de escoamento vertical – WCV. Fonte: PPGEA/UFSC, 2021, adaptado de Acervo GESAD. 74
Figura 3-1. Representação esquemática das células de rio/canal e apresentação do corte da seção transversal. O corte apresenta a opção (a) de representação de seção simples e a opção (b) de representação composta. Fonte: Elaboração própria. 76
Figura 3-2. Representação esquemática do processo de divisão de células de planície urbanizada. Fonte: Elaboração própria. 77
Figura 3-3. Representação esquemática do processo de divisão de células de planície natural, não urbanizada. Fonte: Elaboração própria. 78
Figura 3-4. Representação esquemática das células do tipo reservatório. 78
Figura 3-5. Fluxograma da metodologia proposta para simulação integrada dos sistemas de drenagem urbana e esgotamento sanitário. Fonte: Elaboração própria. 82
Figura 3-6. Arranjo esquemático das células de escoamento para a consideração de reatores de mistura completa em redes. Fonte: Elaboração própria. 94
Figura 4-1. Localização da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, Áreas de Planejamento do Município do Rio de Janeiro e Regiões de Planejamento da AP5. Fonte: Elaboração em conjunto com o projeto de extensão na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu da UFRJ. 103
Figura 4-2. Mapa da Hidrografia Principal na Bacia Hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu. Fonte: Elaboração em conjunto com o projeto de extensão na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu da UFRJ. 104
Figura 4-3. Mapa de abrangência de rede para esgotamento sanitário na bacia, por porcentagem de domicílios atendidos por rede de esgoto ou rede de drenagem. Fonte: IBGE (2010). 107
Figura 4-4. Mapa de regiões com esgoto a céu aberto na bacia. Fonte: IBGE (2010). .107
Figura 4-5. Mapa do percentual de domicílios da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu que possuem de boca de lobo ou bueiro no seu entorno. Fonte: IBGE (2010). 108
Figura 4-6. Diagnóstico das inundações na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu Fonte: PDMAP (2012) 110
Figura 4-7. Mancha de inundação na região a jusante da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu para os tempos de retorno de 25 e 50 anos Fonte: AquaFluxus (2020) 112

Figura 4-8. Localização da sub-bacia de interesse que será tratada como área específica de estudo para desenvolvimento da metodologia proposta. Fonte: Elaboração própria. 114
Figura 4-9. Delimitação da sub-bacia hidrográfica foco do presente estudo. Fonte: Elaboração própria.....115
Figura 4-10. Principais elementos urbanos da sub-bacia de estudo. Fonte: Elaboração própria.....116
Figura 4-11. Modelo digital de terreno na região de interesse. Fonte: Elaboração própria. 118
Figura 4-12. Fotografia da Estrada do Moinho. Fonte: Google Street View (2022).....119
Figura 4-13. Fotografia da Praça Pedro Veloso da Silveira. Fonte: Google Street View (2022). 120
Figura 4-14. Principais espaços livres que já possuem uso urbano na sub-bacia em questão. Fonte: Google Earth (2022).....120
Figura 4-15. Fotografia da Igreja Santa Clara do Moinho e do campo de futebol. Fonte: Fotógrafo André Sant'anna para o Google. 121
Figura 4-16. Contribuição de águas urbanas em tempo seco no rio Prata do Cabuçu. Fonte: Google Street View (2022).....123
Figura 4-17. Contribuição de águas urbanas em tempo seco no rio Prata do Cabuçu dentro da área de estudo. Fonte: Google Street View (2022).....123
Figura 4-18. Contribuição direta de sistema de esgotamento sanitário residencial na Rua Irajuba para o rio Prata do Cabuçu. Fonte: Google Street View (2022). 124
Figura 4-19. Exemplo de possível interação entre os sistemas de drenagem e de esgotamento sanitário antes da contribuição ao rio Prata do Cabuçu, na Rua Rodrigues Campêlo. Fonte: Google Street View (2022). 124
Figura 4-20. Exemplo de possível interação entre os sistemas de drenagem e de esgotamento sanitário na Rua Rodrigues Campêlo. Fonte: Google Street View (2022). 125
Figura 4-21. Caso típico de caixa ralo tampada devido ao mau odor gerado pela contribuição de esgotos domésticos no sistema de drenagem na rua Severino Ferreira da Costa. Fonte: Google Street View (2022). 125
Figura 4-22. Acúmulo de água sobre tampa de poço de visita. Fonte: Google Street View (2022). 126

Figura 4-23. Acúmulo de água na rua Severino Ferreira Costa, mesmo em tempo seco, evidenciando o mau funcionamento do sistema de drenagem. Fonte: Google Street View (2022). 127
Figura 4-24. Caixa ralo obstruída associada a acúmulo de água na rua Severino Ferreira Costa. Fonte: Google Street View (2022). 127
Figura 4-25. Chuva de projeto para o sistema de macrodrenagem considerando o TR de 25 anos, indicado para o dimensionamento do sistema. Fonte: Elaboração própria. 129
Figura 4-26. Hietograma das chuvas de projeto considerando os tempos de recorrência de 10 e 25 anos para a sub-bacia do rio Prata do Cabuçu e para a sub-bacia urbana foco do presente estudo. Fonte: Elaboração própria.....130
Figura 4-27. Divisão da bacia dos rios Piraquê-Cabuçu em células de escoamento para representação do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração conjunta com o projeto de extensão da UFRJ. 133
Figura 4-28. Variação de maré considerada como condição de contorno de jusante do modelo de macrodrenagem.....134
Figura 4-29. Resultados da simulação do sistema de macrodrenagem da bacia do rio Piraquê-Cabuçu para o TR25 anos. Fonte: Elaboração conjunta com o projeto de extensão da UFRJ. 135
Figura 4-30. Hidrograma representando a variação de vazão no rio Prata do Cabuçu para o TR 25, ao qual contribui a região de interesse. Fonte: Elaboração própria.....136
Figura 4-31. Representação esquemática da comunicação entre lotes e ruas pela equação de vertimento, bem como a ligação de orifício e ruas devido à falta de sistema de drenagem urbano. Fonte: Elaboração própria. 138
Figura 4-32. Divisão da área de interesse em células de escoamento par representação do escoamento superficial. Fonte: Elaboração própria.....139
Figura 4-33. Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 10 anos considerando apenas a camada superficial da sub-bacia de estudo, sem contribuição do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração própria.....141
Figura 4-34. Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 25 anos considerando apenas a camada superficial da sub-bacia de estudo, sem contribuição do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração própria.....142
Figura 4-35. Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 25 anos considerando apenas a camada superficial da sub-bacia de estudo, com contribuição do sistema de

macrodrenagem pela sobre-elevação do nível do rio Prata do Cabuçu. Fonte: Elaboração própria.....143
Figura 4-36. Delimitação das bacias de contribuição para dimensionamento do sistema de microdrenagem. Fonte: Elaboração própria. 145
Figura 4-37. Representação de uma galeria e do escoamento em duas camadas. Fonte: Sousa, 2017.....146
Figura 4-38. Representação esquemática da conexão entre telhados e poços de visita para o sistema de drenagem, levando em conta a conexão predial e urbana. Fonte: Elaboração própria.....147
Figura 4-39. Perfil da galeria principal do sistema 1 de drenagem da área de estudo. Fonte: Elaboração própria.....148
Figura 4-40. Perfil da galeria principal do sistema 1 de drenagem da área de estudo. Fonte: Elaboração própria.....148
Figura 4-41. Perfil da galeria principal do sistema 1 de drenagem da área de estudo. Fonte: Elaboração própria.....149
Figura 4-42. Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 10 anos considerando a camada superficial da sub-bacia de estudo e a camada do sistema de microdrenagem, sem contribuição do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração própria. 150
Figura 4-43. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 1 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 10 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria. 151
Figura 4-44. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 2 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 10 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria. 151
Figura 4-45. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 3 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 10 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria. 152
Figura 4-46 Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 25 anos considerando a camada superficial da sub-bacia de estudo e a camada do sistema de microdrenagem, sem contribuição do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração própria. 153
Figura 4-47. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 1 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 25 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria. 154

Figura 4-48. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 2 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 25 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria. 154
Figura 4-49. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 3 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 25 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria. 155
Figura 4-50. Diferença das vazões de contribuição da sub-bacia de estudo no rio Prata do Cabuçu para os cenários com e sem rede de microdrenagem sob um evento de TR10. Fonte: Elaboração própria. 156
Figura 4-51. Diferença das vazões de contribuição da sub-bacia de estudo no rio Prata do Cabuçu para os cenários com e sem rede de microdrenagem sob um evento de TR25. Fonte: Elaboração própria. 156
Figura 4-52. Perfil de níveis máximos para a galeria principal do Sistema 1 considerando um evento com TR10. Fonte: Elaboração própria.....157
Figura 4-53. Perfil de níveis máximos para a galeria principal do Sistema 2 considerando um evento com TR10. Fonte: Elaboração própria.....158
Figura 4-54. Perfil da Linha Piezométrica (L.P.) máxima para a galeria principal do Sistema 3 considerando um evento com TR10, onde é observado o funcionamento sob pressão. Fonte: Elaboração própria. 158
Figura 4-55. Mancha de inundação considerando o sistema de microdrenagem em funcionamento com a cheia do rio Prata do Cabuçu para o TR25. Fonte: Elaboração própria.....159
Figura 4-56. Perfil de níveis máximos para a galeria principal do Sistema 1 considerando um evento com TR25. Fonte: Elaboração própria.....160
Figura 4-57. Perfil de níveis máximos para a galeria principal do Sistema 2 considerando um evento com TR25. Fonte: Elaboração própria.....160
Figura 4-58. Perfil da Linha Piezométrica (L.P.) máxima para a galeria principal do Sistema 3 considerando um evento com TR25. Fonte: Elaboração própria.....161
Figura 4-59. Representação esquemática das ligações entre as células de PV de esgoto, ruas e lotes. Fonte: Elaboração própria. 163
Figura 4-60. Traçado da rede de esgotamento sanitário, dupla e posicionadas no passeio proposta para o Sistema 1. Fonte: Elaboração própria. 164
Figura 4-61. Resultados da simulação hidrodinâmica para a rede de esgotamento sanitário. Fonte: Elaboração própria.....165

Figura 4-62. Vazão de contribuição à ETE para a simulação exclusiva do funcionamento do sistema de esgotamento sanitário, modelo em partida fria. Fonte: Elaboração própria. 166
Figura 4-63. Resultados da simulação para TR10 considerando a camada superficial de drenagem e um sistema de esgotamento implementado para o Sistema 1 da sub-bacia de interesse. Fonte: Elaboração própria. 169
Figura 4-64. Resultados da simulação para TR25 considerando a camada superficial de drenagem e um sistema de esgotamento implementado para o Sistema 1 da sub-bacia de interesse. Fonte: Elaboração própria. 170
Figura 4-65. Vazões afluentes à ETE considerando o cenário sem rede de microdrenagem para a situação de tempo seco, e para as precipitações de projeto de TR 10 e 25 anos. Fonte: Elaboração própria. 171
Figura 4-66. Resultados da contribuição pluvial no sistema de esgotamento sanitário pelos tampões dos poços de visita para um evento de TR 10 anos. Fonte: Elaboração própria. 173
Figura 4-67. Resultados da contribuição pluvial no sistema de esgotamento sanitário pelos tampões dos poços de visita para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria. 174
Figura 4-68. Resultados da contribuição pluvial no sistema de esgotamento sanitário pelas caixas de inspeção das edificações para um evento de TR 10 anos. Fonte: Elaboração própria.....175
Figura 4-69. Resultados da contribuição pluvial no sistema de esgotamento sanitário pelas caixas de inspeção das edificações para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria.....176
Figura 4-70. Extravasamento do sistema de esgotamento sanitário pelos tampões dos poços de visita para um evento de TR 10 anos. Fonte: Elaboração própria.....177
Figura 4-71. Extravasamento do sistema de esgotamento sanitário pelos tampões dos poços de visita para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria.....178
Figura 4-72. Extravasamento do sistema de esgotamento sanitário pelas caixas de inspeção das edificações para um evento de TR 10 anos. Fonte: Elaboração própria. .179
Figura 4-73. Extravasamento do sistema de esgotamento sanitário pelas caixas de inspeção das edificações para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria. .180
Figura 4-74. Mancha de inundação ocasionada pela falta de manutenção dos sistemas de microdrenagem e macrodrenagem para o TR 10. Fonte: Elaboração própria.....182

Figura 4-75. Mancha de inundação ocasionada pela falta de manutenção dos sistemas de microdrenagem e macrodrenagem para o TR 25. Fonte: Elaboração própria. 183
Figura 4-76. Simulação das redes de drenagem do Sistema 1 recebendo a contribuição de esgoto para tempo seco. Fonte: Elaboração própria. 185
Figura 4-77. Simulação das redes de drenagem do Sistema 2 recebendo a contribuição de esgoto para tempo seco. Fonte: Elaboração própria. 185
Figura 4-78. Simulação das redes de drenagem do Sistema 3 recebendo a contribuição de esgoto para tempo seco. Fonte: Elaboração própria. 186
Figura 4-79. Localização do empreendimento domiciliar hipotético da bacia de esgotamento do Sistema 1. Fonte: Elaboração própria.....189
Figura 4-80. Vista frontal da entrada do novo empreendimento domiciliar hipotético para o qual será verificado o aumento da contribuição de esgoto. Fonte: Google Street View (2022) 190
Figura 4-81. Níveis de esgoto sanitário na célula correspondente ao poço de visita que recebe hipoteticamente uma região de expansão urbana. Fonte: Elaboração própria. ..191
Figura 4-82. Esquema de representação da contribuição pluvial predial no sistema de esgotamento sanitário. Fonte: Elaboração própria. 193
Figura 4-83. Esquema de modelagem da situação regular e parasitária a partir da representação do mesmo telhado das edificações. Fonte: Elaboração própria. 194
Figura 4-84. Vazões de contribuição à ETE para diversos cenários de contribuição parasitária de edificações, considerando uma rede de microdrenagem funcional. Fonte: Elaboração própria.....196
Figura 4-85. Resposta do sistema ao aumento de contribuição parasitária no TR 10. Relação parasitária-incremento de vazão do sistema. Fonte: Elaboração própria. 197
Figura 4-86. Variação de nível e concentração de DBO na célula de rua número 1039. Fonte: Elaboração própria. 200
Figura 4-87. Vazões afluentes à célula de rua 1039. Fonte: Elaboração própria. 200
Figura 4-88. Variação de nível e concentração de DBO na célula de lote número 2021. Fonte: Elaboração própria. 201
Figura 4-89. Variação de nível e concentração de DBO na célula de lote número 2047. Fonte: Elaboração própria. 202
Figura 4-90. Variação de DBO no Rio Prata do Cabuçu na seção mais próxima ao exutório do sistema de esgotamento sanitário. Fonte: Elaboração própria. 202

Figura 4-91. Concentração de DBO nas águas mistas presentes no PV de esgoto representado pela célula 32062. Fonte: Elaboração própria. 203
Figura 4-92. Concentração de DBO nas águas mistas presentes no PV de esgoto representado pela célula 32008. Fonte: Elaboração própria. 204
Figura 4-93. Concentração de DBO do fluxo (águas pluviais e esgoto) afluente à ETE para o TR10. Fonte: Elaboração própria. 204
Figura 4-94. Localização das células de escoamento com resultados apresentados em relação à concentração de DBO. Fonte: Elaboração própria. 205
Figura 4-95. Identificação dos principais espaços livres de edificações na sub-bacia e locais com potencial para implementação de reservatórios de amortecimento de cheias e tratamento de águas residuais. Fonte: Elaboração própria. 207
Figura 4-96. PV com extravasor para o reservatório e com comporta unidirecional para o rio de maneira a evitar a contribuição de jusante para montante do curso principal, bem como o seu remanso para TRs menores. Fonte: Elaboração própria. 209
Figura 4-97. Representação do poço de visita com vertedor para separação da contribuição em tempo seco e de baixas precipitações. Fonte: adaptado de Tchobanoglous e Burton, (1991) apud Madeira (2012). 210
Figura 4-98. Representação esquemática do funcionamento do sistema integrado para melhoria do funcionamento dos sistemas de esgotamento sanitário e drenagem urbana. Fonte: Elaboração própria. 210
Figura 4-99. Perfil de níveis máximos do Sistema 1 para a situação de implementação de wetlands construída e reservatório de amortecimento de cheias diante de um evento de TR25. Fonte: Elaboração própria. 212
Figura 4-100. Perfil de níveis máximos do Sistema 2 para a situação de implementação de wetlands construída e reservatório de amortecimento de cheias diante de um evento de TR25. Fonte: Elaboração própria. 212
Figura 4-101. Perfil de níveis máximos do Sistema 3 para a situação de implementação de wetlands construída e reservatório de amortecimento de cheias diante de um evento de TR25. Fonte: Elaboração própria. 213
Figura 4-102. Mancha de inundação para o cenário de projeto para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria. 214
Figura 5-1. Hietograma do dia em que ocorreu o colapso da estrutura. Fonte: INMET. 216

Figura 5-2. Evento de referência (TR10) para verificação do funcionamento do sistema de microdrenagem. Fonte: Elaboração própria.....216
Figura 5-3. Vazões afluentes à EEE para o Cenário 2 com 0% de conexões irregulares. Fonte: Elaboração própria. 221
Figura 5-4. Vazões afluentes à EEE para o Cenário 2 com 5% de conexões irregulares. Fonte: Elaboração própria. 222
Figura 5-5. Vazões afluentes à EEE para o Cenário 2 com 10% de conexões irregulares. Fonte: Elaboração própria. 222
Figura 5-6. Vazões afluentes à EEE para o Cenário 2 com 15% de conexões irregulares. Fonte: Elaboração própria. 223

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Medidas estruturais (Ponce e Simons *et al*. 1977) 19
Tabela 2-2. Normas brasileiras relativas a sistemas de esgotamento sanitário (ABNT, 2022). 34
Tabela 2-3. Características principais dos parâmetros de oxigênio dissolvido e matéria orgânica. Fonte: Von Sperling (2014). 51
Tabela 2-4. Características e descrições da zona de degradação. Fonte: Von Sperling (2014). 52
Tabela 2-5. Características e descrições da zona de decomposição ativa. Fonte: Von Sperling (2014). 53
Tabela 2-6. Características e descrições da zona de recuperação. Fonte: Von Sperling (2014). 54
Tabela 2-7. Características e descrições da zona de águas limpas. Fonte: Von Sperling (2014). 55
Tabela 2-8. Características das representações hidráulicas comumente utilizadas para reatores. Fonte: Von Sperling (2014) 58
Tabela 3-1. Arranjos disponibilizados para a modelagem integrada (MODCEL-SHIM) dos principais elementos do sistema superficial, de drenagem e de esgotamento. Fonte: Elaboração própria. 89
Tabela 4-1. Informações dos principais cursos d'água na bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu. Fonte: Rio de Janeiro, 2012. 105
Tabela 4-2. Resultados da simulação de incremento populacional e impactos sobre a rede de esgotamento sanitário. Fonte: Elaboração própria. 190
Tabela 4-3. Valores de concentração dos parâmetros de DBO frente a tempo do evento pluviométrico. Fonte: Weibel *et al*. (1964) 199
Tabela 5-1. Resumo dos Cenários de Simulação. Fonte: Elaboração própria. 220

1 INTRODUÇÃO

Segundo o CRED (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*), entre 2000 e 2019, 44% dos desastres naturais ocorridos no mundo tiveram origem nas inundações, as quais afetaram 1,41 bilhão de pessoas, representando 41% de toda a população que foi exposta a algum desastre neste período (CRED & UNDRR, 2020). O Brasil ocupa a 9ª posição no ranking de número absoluto de afetados por inundações, com 25% dos desastres naturais registrados relacionados a eventos de inundações, tendo afetado mais de 43 milhões de pessoas entre 2000 e 2019 (CEPED/UFSC, 2020). Estes valores confirmam a grande importância dos investimentos em projetos para mitigação dos danos e prejuízos advindos das inundações.

Na medida em que a urbanização aumenta e se expande, pode ocupar as várzeas e impermeabilizar o solo, dificultando a infiltração da água pluvial, aumentando o escoamento superficial, e realocando essas águas para outros lugares mais baixos e que não eram atingidos pelas inundações. Dessa forma, os eventos de inundação passam a ser mais frequentes e severos, causando inúmeros prejuízos. Percebe-se, portanto, que há uma relação direta entre o planejamento da cidade, falho no que diz respeito ao tratamento das águas urbanas, e a sua consequente degradação.

A partir desta constatação, CANHOLI (2005) sustenta a abordagem da drenagem urbana como um problema de alocação de espaços. Ou seja, se há uma ocupação do espaço naturalmente alagável, as águas, que ali deveriam estar, serão deslocadas para outras áreas, podendo resultar em inundações em locais anteriormente seguros. Adicionalmente, cumpre destacar que os espaços requeridos pelas águas pluviais em uma cidade, como consequência do próprio processo de urbanização, são maiores que os espaços originais naturais. Porém, de forma geral, a abordagem tradicional utilizada no controle de cheias urbanas implicou em frequentes intervenções de caráter pontual e corretivo, realizadas, em geral, em resposta e posteriormente a algum evento de chuvas intensas (REZENDE, 2018).

Um resultado prático, frequentemente observado nas cidades, é o agravamento dos problemas resultantes das inundações, com transferência de alagamentos. Este problema se articula fortemente, portanto, com as questões de uso do solo. Fatores de cunho tipicamente urbano, como o déficit habitacional, por exemplo, acabam surgindo como

agentes agravantes do problema, com a ocupação irregular de faixas marginais, que deveriam ser espaços do rio. O acentuado crescimento urbano exige cada vez mais uma abordagem voltada para o planejamento do território segundo uma lógica de gerenciamento de risco. No ano de 2017, a população urbana global correspondia a 55% do total, porém, quando avaliamos o conjunto de países da América Latina, esta porcentagem se acentua, correspondendo a cerca de 81%. No Brasil, este processo é ainda mais significativo, apresentando uma população urbana correspondente a 84,3% do total (FARIAS *et al*., 2017).

As inundações frequentes têm como consequência a degradação do ambiente urbano construído, interferindo sobre vários outros sistemas urbanos, principalmente sobre as infraestruturas críticas, como por exemplo subestações de energia, terminais intermodais, hospitais, estações de tratamento de águas, entre outros, em um efeito conhecido como cascata (GUIMARÃES *et al*., 2021).

O sistema de esgotamento sanitário, por sua vez, é fortemente associado ao sistema de drenagem urbana, apesar da solução com sistema separador absoluto ter sido norteadora dos projetos de engenharia no Brasil (Figura 1-1). Vale destacar que o sistema do tipo separador absoluto possui uma lógica sanitarista na qual os esgotos sanitários e pluviais seguem de maneira separada para se garantir o tratamento dos esgotos sanitários. No entanto, isto traz um custo maior pela duplicidade da rede e pela necessidade de conduzir o esgoto bruto até uma estação de tratamento de esgoto (ETE) antes do lançamento final em um corpo d'água.

Porém, a situação vislumbrada nas cidades brasileiras é precária, tanto no que diz respeito à coleta dos esgotos sanitários, quanto, principalmente, do seu tratamento. Segundo dados do SNIS (2021) apenas 63,2% da população urbana do Brasil é atendida pela rede de esgoto, enquanto, 50,8% do esgoto é tratado. Vale destacar que, os dados de tratamento muitas vezes não correspondem à real situação do sistema de esgotamento sanitário.

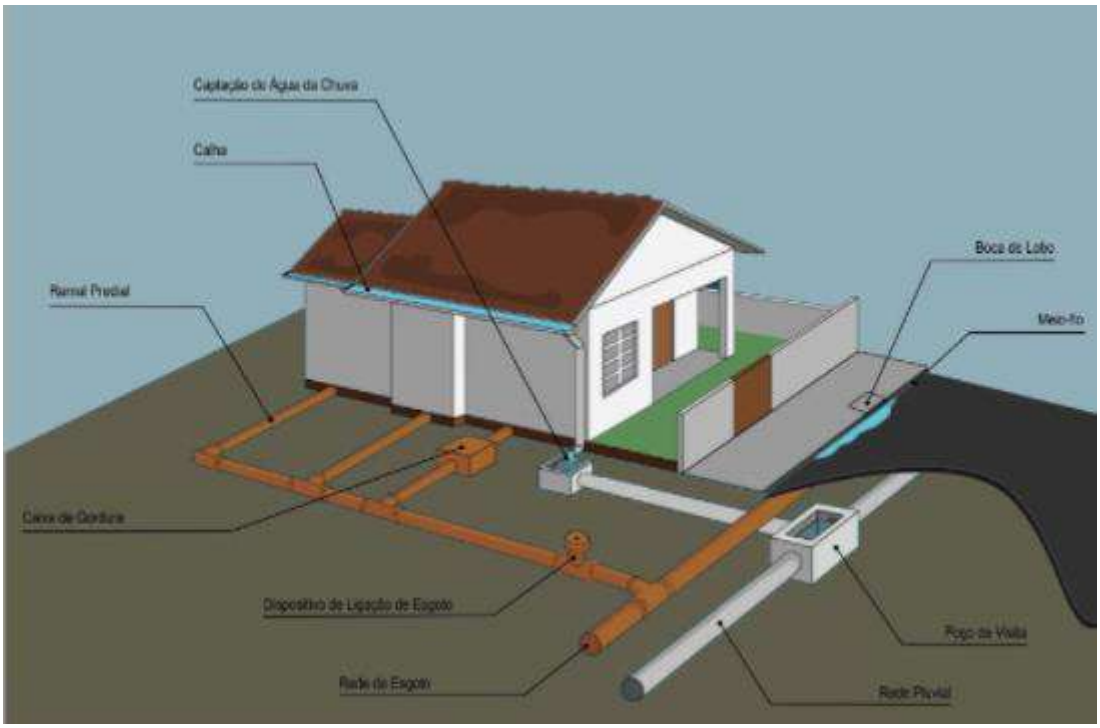

Figura 1-1. Esquema da Situação adequada das redes de drenagem e esgotamento sanitário.
Fonte: Próprio autor

É importante salientar que a coleta do esgoto é fundamental para garantir condições sanitárias às habitações, mas sua coleta simples, sem tratamento, é um fator crucial nas questões de degradação ambiental.

O desenvolvimento econômico e social efetivo das áreas urbanas só será alcançado quando houver um razoável nível de eficiência na coleta e tratamento dos esgotos sanitários. Pode-se notar que a qualidade do sistema de coleta e tratamento de esgoto doméstico brasileiro é absolutamente insuficiente para proporcionar habitantes e ambientes saudáveis (SNIS, 2018). Os índices de coleta e tratamento fornecidos pelo SNIS mostram que, mesmo os esforços de planos e programas na busca pela universalização do serviço ao longo dos anos, não foram suficientes para indicar melhorias significativas acerca do serviço.

No que se refere às principais cidades brasileiras, é comum verificar grandes falhas no sistema separador instalado, seja por subdimensionamento do sistema de drenagem instalado, seja por ligações clandestinas ou irregulares de esgoto na rede de drenagem (Câmara Metropolitana do Rio de Janeiro, 2017), conforme pode ser visto no esquema da Figura 1-2. Há ainda casos em que contribuições de instalações prediais “parasitas” contribuem com água pluvial para o sistema de esgotamento sanitário, sobrecarregando

as redes não dimensionadas para essas vazões. Um esquema deste tipo de ligações "parasitárias" pode ser observado na Figura 1-3. Soma-se a estas dificuldades operacionais o risco de mudanças climáticas, que, através de possíveis incrementos de volumes de água precipitados, podem fazer exceder a capacidade hidráulica e potencializar extravasamentos das redes de esgotamento pluvial e sanitário.

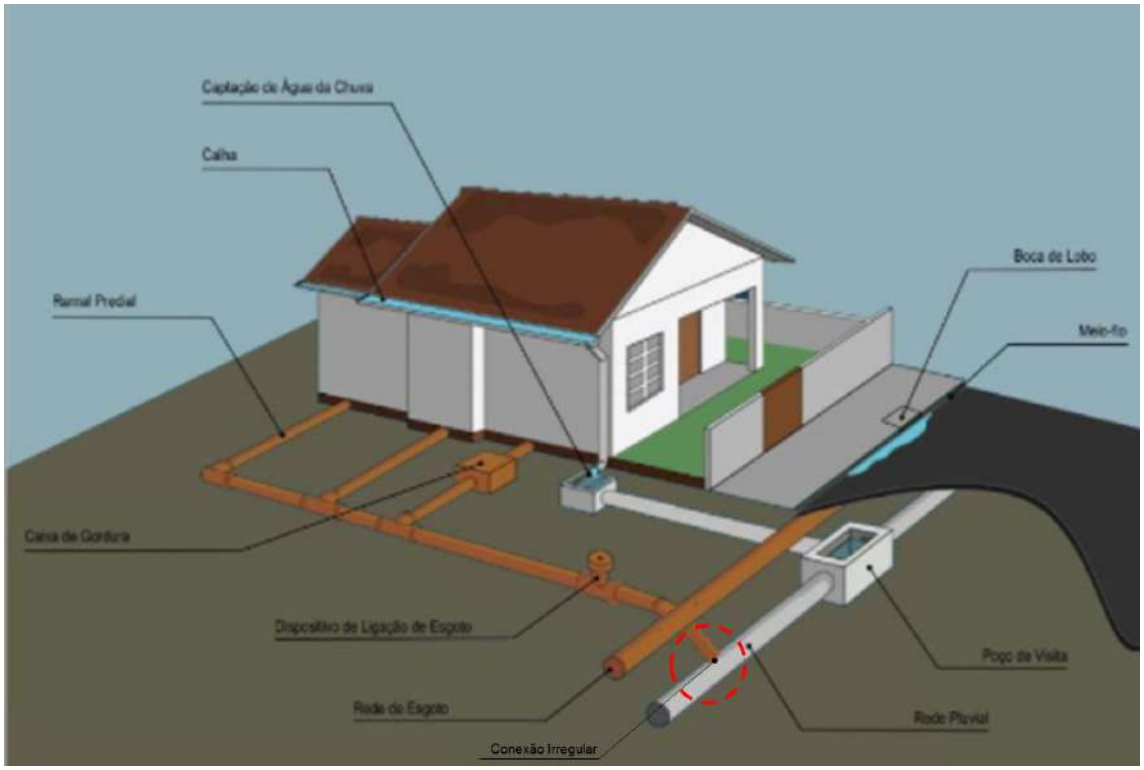

Figura 1-2. Esquema da Situação de Contribuição clandestina ou irregular entre as redes de esgotamento sanitário e de drenagem, esgoto na drenagem. Fonte: Próprio autor.

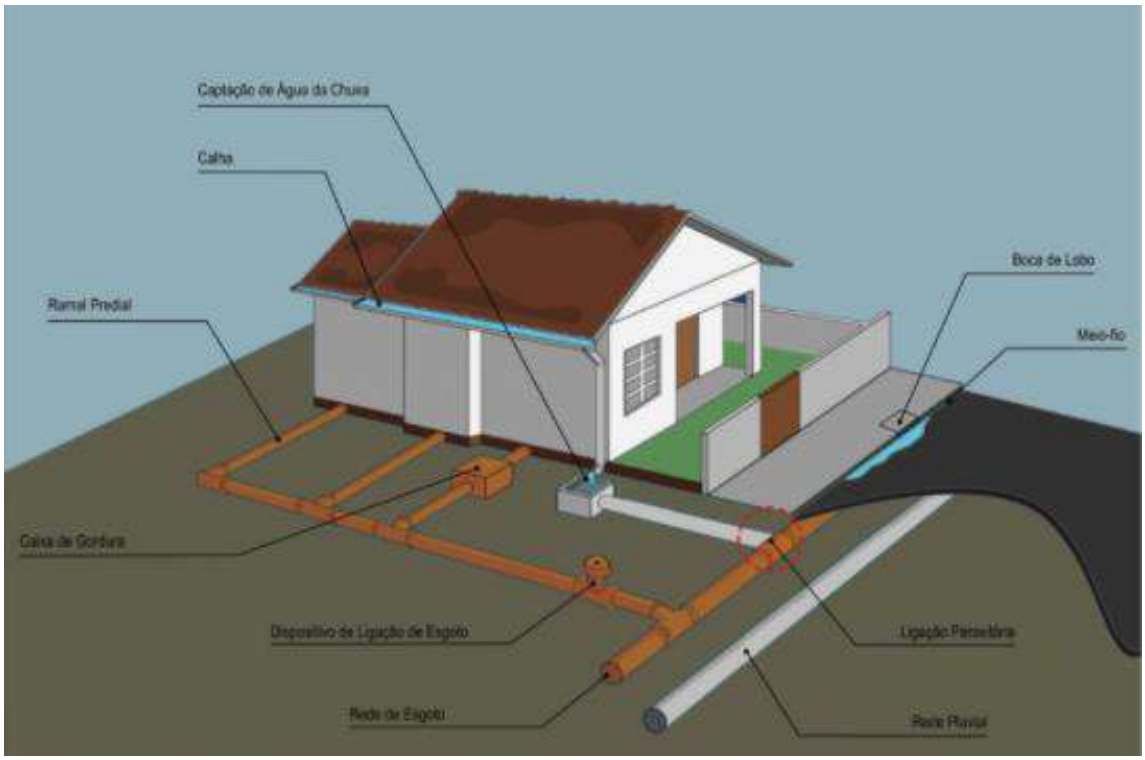

Figura 1-3. Esquema da Situação de Contribuição parasitária entre as redes de esgotamento sanitário e de drenagem, drenagem no esgoto. Fonte: Próprio autor.

Assim, a necessidade de analisar o funcionamento conjunto das redes torna-se fundamental para uma correta interpretação dos problemas apresentados. Em consequência, cada vez mais, são demandadas ferramentas que possibilitem o correto diagnóstico e prognóstico dessas e de outras infraestruturas críticas da cidade, de forma integrada.

Por outro lado, vale destacar o Sistema de Coleta a Tempo Seco (CTS), que consiste na interceptação dos efluentes sanitários nas galerias pluviais, em períodos sem chuva, de maneira a evitar, mesmo que de forma parcial, que os esgotos sejam lançados *in natura* nos corpos d'água receptores. Para viabilização deste sistema são instaladas caixas coletoras, coletores-tronco ou interceptores e estações elevatórias, que transportam o esgoto, em tempo seco, ao sistema de esgotamento sanitário existente ou diretamente para as estruturas de tratamento. O Sistema de CTS tem o potencial de resolver os problemas sanitários em regiões com maiores déficits de rede de esgoto, utilizando o sistema de drenagem como um sistema coletor único.

Para locais com menor déficit de redes de esgotamento sanitário, este tipo de alternativa poderá servir para resolver problemas de interação indevida entre os sistemas de esgoto

e drenagem, bem como, para futuramente tratar a poluição difusa, advinda da água de primeira lavagem de chuva (lavagem da atmosfera e do solo com as chuvas).

Assim, alternativas de Captação em Tempo Seco vêm se estabelecendo como solução para aumento da Resiliência Ambiental no sistema de esgotamento sanitário (Câmara Metropolitana do Rio de Janeiro, 2017). Como citado, a CTS visa tratar as águas poluídas antes dessas águas alcançarem os corpos hídricos naturais (Fundação COPPETEC/UFRJ, 2018), criando um escudo de defesa para a drenagem, no contexto do sistema separador absoluto, uma vez que, originalmente, esta não tem qualquer proteção para descargas de esgoto, por não haver previsão técnica nas suas diretrizes de projeto para esta possibilidade, que é, de fato, disfuncional.

A Lei Federal 11.445/2007 (BRASIL, 2007), chamada de Lei Nacional de Saneamento Básico - LNSB, atualizada pela Lei 14.026/2020 (BRASIL, 2020), estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e, em seu artigo 2º, define os princípios fundamentais para a prestação deste serviço. Na Lei, fica clara a necessidade de que um saneamento básico integrado e universal seja oferecido com vistas à melhoria da qualidade de vida e preservação ambiental. Dessa forma, o saneamento básico precisa de coleta e tratamento do esgoto adequados antes que este se torne um problema ambiental e de saúde pública. Não se deve admitir, por premissa legal, o tratamento de águas depois de os rios serem alcançados pelo esgoto, quando a rede de drenagem está já parcialmente obstruída, quando o rio já está degradado e quando os problemas ambientais e de saúde pública já se instalaram (Câmara Metropolitana do Rio de Janeiro, 2017). Soluções alternativas de estações de tratamento de rios, por exemplo, podem prover solução para corpos receptores finais, como lagoas, mas não mudam o quadro de degradação da bacia hidrográfica, habitada por comunidades que continuarão vivendo em contato com problemas de esgotamento sanitário não resolvidos.

Complementarmente às captações em tempo seco, alternativas com caráter multifuncional, que funcionem como dispositivos para a adaptação a essas circunstâncias e estejam preparadas para cenários futuros adversos, como os possíveis impactos das mudanças climáticas, devem ser desenvolvidas seguindo os conceitos de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e infraestruturas-verdes e azul. Estes conceitos vêm sendo cada vez mais difundidos internacionalmente,

como fundamento tecnológico para o enfrentamento e contenção de inundações e tratamento das águas residuais urbanas.

As SBN vêm se tornando prioridade de investimentos na União Europeia, que está financiando projetos que adotem esta abordagem (NATURE-BASED SOLUTIONS, 2022) e entrou recentemente na agenda dos Estados Unidos, conforme discurso apresentado pela atual administração Biden/Harris na COP27, no Egito (FACT SHEET, 2022).

1.1 Resumo do Estado da Arte

O presente tópico apresenta de maneira resumida as revisões bibliográficas realizadas no capítulo 2.5 (Estado da Arte do Estudo Integrado das Redes Urbanas de Drenagem Pluvial e Esgotamento Sanitário) cujo principal objetivo é mostrar a relevância da presente ferramenta metodológica diante do cenário científico global.

As investigações dos diversos estudos realizados até momento permitiram identificar que nos últimos 40 anos o tratamento integrado das águas urbanas vem sendo estudado de maneira recorrente. Porém, na contramão da técnica utilizada no Brasil, o mundo tem tratado os esgotos (pluvial e sanitário) de maneira integrada, em um só sistema, com adaptações para defender o meio ambiente natural e construído (EPA, 1983). Visto este tratamento diferente das águas urbanas, as principais publicações internacionais no tema trataram de problemas técnicos específicos para esta escolha, deixando o Brasil e os países que ainda adotam a solução de separador absoluto sem contribuições significativas para o avanço da técnica separadora.

Assim, o estudo integrado das águas urbanas não significa necessariamente a integração e simulação de duas redes de esgotamento. Diversos trabalhos tratam da simulação de sistemas unitários os quais, são previstos, desde sua concepção, para funcionarem com o aporte de águas de chuva e efluentes sanitários em uma rede única (GUPTA & SAUL, 1996; SZTRUHÁR *et al*., 2002).

Adicionalmente, o conceito de transbordamentos de esgotos combinados (*Combined Sewer Overflows* - CSOs), presentes em diversas publicações (TODESCHINI *et al.*, 2012; MONTSERRAT *et al*., 2014; JEAN *et al*., 2021), estão inteiramente associados ao funcionamento e simulação de apenas uma rede. Além disso, o seu extravasamento não é

simulado por uma camada superior de escoamento, devido às limitações de representação hidráulica dos modelos escolhidos.

Os diversos trabalhos têm como foco principal a análise da qualidade ambiental das falhas de sistemas unitários que podem contribuir negativamente para a cidade e meio ambiente (GUPTA & SAUL, 1996; SZTRUHÁR *et al*., 2002; RIECHEL *et al*. 2016).

Além disso, soluções de Infraestrutura Verde e Drenagem Urbana Sustentável são exploradas em alguns casos, porém, novamente com foco no CSO de sistemas unitários e sem a representação específica de uma camada superficial que simule os escoamentos no meio urbano (JOSHI, *et al*., 2020; JEAN *et al*., 2021).

Nacionalmente, a interação das redes de esgotamento tem sido estudada frequentemente (DIAS, 2003; BAHIA, 2010; CÂMARA METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO, 2017), porém, as representações hidrodinâmicas do fenômeno não possuem avanços significativos. Destaca-se apenas o trabalho de Radesca (2018) como tentativa inicial de simulação dos sistemas. Porém, a autora desenvolve apenas a simulação hidrodinâmica de redes unitárias e realiza a representação de um cenário de redes separadoras de forma não integrada ao sistema de simulação.

1.2 Motivação

Comunicações irregulares entre os sistemas de drenagem e esgotamento sanitário, além do quadro de agravamento de alamentos e inundações urbanas, em um contexto que tende a se intensificar em face da possibilidade cada vez mais premente das mudanças climáticas globais, fazem com que o sistema de drenagem e de esgotamento possam ser considerados misto em grande parte das cidades do Brasil e com possibilidade de sofrerem maiores estresses no futuro próximo. O sistema de esgotamento sanitário é inicialmente concebido para receber contribuições de águas residuais e de águas de infiltração, porém, na prática, a partir de contribuição irregulares ou da ocorrência de eventos de inundação e alagamento, recebe também a contribuição de águas pluviais. A contribuição no sentido contrário também ocorre com frequência, quando o sistema de drenagem urbano recebe a contribuição irregular de águas residuais, principalmente, por falha ou inexistência do sistema de esgotamento. Porém, esse último caso reflete um caso disfuncional. Deve-se destacar que existe previsão técnica (TOMAZ, 2011) (e perfeitamente aceitável) para sistemas de esgotamento sanitário do tipo unitário, em que

as vazões de drenagem e esgotamento sanitário dividem a mesma rede. Nesse sistema, com respaldo técnico, todas as vazões captadas em tempo de estiagem são encaminhadas para tratamento, só sendo extravasadas vazões de esgoto diluídas pela contribuição pluvial, quando excedida a capacidade de tratamento. Nos sistemas de drenagem disfuncionais, porém, águas de chuva e esgotos caminham juntos, mas sem tratamento, com descarga direta para os corpos receptores finais.

A avaliação conjunta e integrada destas duas redes, com a introdução de CTS em sistemas separadores existentes e a implantação de sistemas unitários com CTS em bairros com maior déficit de redes; incluindo a possibilidade de tratamentos distribuídos, com uso de infraestruturas verde e azul, é uma demanda essencial para a adequada avaliação do problema e proposição de melhor relação custo-efetividade. Entretanto, a partir do estudo do estado da arte apresentado no capítulo de revisão bibliográfica, não há ferramentas matemáticas e computacionais disponíveis para avaliar conjuntamente estes dois sistemas, e suas interações espaciais, no âmbito da paisagem urbana (como camada superficial do escoamento pluvial). A proposição de uma ferramenta metodológica de modelagem, oferecendo a possibilidade de construção de sistemas integrados, a partir de estruturas topológicas que representam as interações entre as redes de drenagem e esgotamento sanitário, pode ser muito útil para profissionais das municipalidades e das empresas públicas ou privadas de saneamento.

1.3 Objetivos

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa possui um objetivo geral e seis específicos, conforme relatados nos itens a seguir.

1.3.1 Geral

O objetivo Geral deste trabalho é:

- Desenvolver uma metodologia de simulação integrada das redes urbanas de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário com a camada de escoamentos superficiais urbanos para diversos casos reais de aplicação que considerem interferências cruzadas no funcionamento destes sistemas.

1.3.2 Específicos

- Desenvolver um método de Simulação Hidrodinâmica Multicamadas (MODCEL-SHIM), integrando os sistemas de drenagem urbana, esgotamento sanitário e escoamentos superficiais (escoamento por ruas e espaços livres) utilizando o Modelo de Células de Escoamento-MODCEL, um modelo *Quasi-2D*;
- Acoplar modelo de qualidade ambiental aos resultados hidrodinâmicos para previsão dos níveis de contaminação de DBO longo das células de escoamento utilizando o modelo de Streeter-Phelps e a consideração de mistura completa entre ligações do MODCEL;
- Criar arranjos topológico-funcionais para representar as situações de interação entre redes de drenagem urbana e esgotamento sanitário, de forma a pré-estabelecer formas de combinar células e ligações existentes no acervo do MODCEL.
- Discutir a importância e o papel da utilização dos conceitos: Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável – SUDS (*Sustainable Urban Drainage Systems*), Espaços Livres, , Soluções Baseadas na Natureza – SBN, Infraestrutura verde e azul e Projeto Urbano Sensível à Água – WSUDS (*Water Sensitive Urban Design*) na abordagem integrada das águas urbanas (esgoto e drenagem), de forma a identificar medidas práticas e incrementar o acervo possível de soluções para sistemas disfuncionais;
- Simular diversos casos de interação entre os sistemas para diagnóstico e prognóstico, que poderão servir como exemplo para futuras aplicações.

1.4 Principais contribuições da tese

Visto o atual estado da arte, a tese tem como principal contribuição disponibilizar uma ferramenta de simulação hidrodinâmica integrada dos sistemas de drenagem, de esgotamento sanitário e dos escoamentos superficiais. A integração será realizada mediante a representação dos escoamentos em cada uma das camadas bem como sua possível conexão e interação. A utilização do modelo de células de escoamento ainda possibilita a procura por soluções fora das redes, que estão em consonância com as recentes proposições sustentáveis no tratamento das águas urbanas. Adicionalmente, será disponibilizado um modelo de qualidade de água que possibilite estimar, além da

simulação integrada dos escoamentos, suas consequências sobre a degradação da qualidade urbana e natural.

1.5 Metodologia Geral

Para a realização deste trabalho foi adotado um procedimento metodológico geral, baseado nas seguintes etapas:

1. Revisão bibliográfica, buscando uma sustentação teórica para o trabalho;

2. Construção de modelos topológicos para articulação de células e ligações pré-existentes no MODCEL, com finalidade de construir bases de simulação logico-conceituais das interações possíveis entre sistemas de águas pluviais e águas residuais;

3. Desenvolvimento de metodologia para o MODCEL de Simulação Hidrodinâmica Multicamadas (SHIM) na qual poderão ser simulados conjuntamente os sistemas de drenagem urbana, esgotamento sanitário e escoamentos superficiais (escoamento por ruas e espaços livres);

4. Desenvolvimento de Modelagem de Qualidade Ambiental Simplificada mediante elaboração de planilha eletrônica paralela aos cálculos hidrodinâmicos para avaliação da qualidade ambiental dos sistemas de drenagem e corpos receptores. A planilha eletrônica representará usando o modelo de Streeter-Phelps as variações da concentração do parâmetro de DBO no espaço e no tempo;

5. Desenvolvimento de proposições para as contribuições de águas residuais no sistema de drenagem urbana a partir de dinâmica de ação baseada em conceitos SUDS, Espaços Livres, SBN, Infraestrutura verde e azul e WSUDS nas quais se procura a melhoria da qualidade urbana e ambiental;

6. Desenvolvimento de proposições para mitigar os efeitos das contribuições de águas pluviais no sistema de esgotamento sanitário a partir do reconhecimento dos pontos críticos de extravasamento.;

7. Discussão dos resultados frente às alternativas e seus possíveis benefícios.

8. Consolidação da metodologia para a simulação de problemas de interação entre os sistemas de drenagem urbana e esgotamento sanitário.

1.6 Organização da tese

Os itens seguintes, que compõem a presente tese, se iniciam com uma revisão bibliográfica no capítulo 2, na qual diversos conceitos relevantes à temática são apresentados, dentre eles se destacam o histórico do saneamento, o sistema de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, o sistema de Esgotamento Sanitário, extravasores, Captações em Tempo Seco e Interceptores, o estado da arte do estudo integrado das redes urbanas de drenagem pluvial e esgotamento sanitário, soluções baseadas na natureza e Projeto Urbano Sensível à Água (*Water Sensitive Urban Design* – WSUD).

O capítulo 3 apresenta de forma detalhada os procedimentos metodológicos desenvolvidos pelo presente trabalho, com o intuito de facilitar sua replicabilidade em casos de estudo.

O capítulo 4 apresenta a avaliação da potencialidade da metodologia utilizando uma bacia piloto para exploração de diversas possibilidades de aplicação da ferramenta proposta. O capítulo também é responsável por mostrar de maneira prática a aplicação da metodologia e sua análise deve ser realizada de maneira complementar ao capítulo anterior para o entendimento íntegro da tese.

O capítulo 5 apresenta a metodologia aplicada a um caso real no qual o estudo integrado dos sistemas de esgotamento e drenagem foi fundamental par um correto diagnóstico.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais a respeito do trabalho desenvolvido bem como apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico do saneamento básico no Brasil

Nomeada de Lei Nacional do Saneamento Básico (LNSB), a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (BRASIL, 2007), define saneamento básico como sendo um conjunto de serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais.

Tal completude do conceito de saneamento básico não é, contudo, algo que atravessa a história do serviço no Brasil. Durante muito tempo, ficaram de fora desse serviço as atividades de limpeza e drenagem urbana, bem como o manejo de resíduos sólidos e de águas pluviais. Sendo assim, para entender a complexidade do cenário atual explorado na pesquisa aqui proposta, faremos um breve resgate histórico sinalizando marcos, mudanças e permanências.

O início desse histórico remonta ao Brasil Colônia, quando os colonizadores europeus chegaram às terras tupiniquins e afetaram práticas que, até aquele momento, garantiam aos povos indígenas saúde estável: acesso a água pura e locais específicos para necessidades fisiológicas e descarte de lixo (CANIVATTO, 1996; REZENDE & HELLER, 2002).

O primeiro registro que se tem de obra de saneamento básico data, contudo, do ano de 1561, quando Estácio de Sá, militar e fundador da cidade do Rio de Janeiro, mandou escavar o primeiro poço de abastecimento de água. Durante esse período, ações de saneamento eram executadas de forma isolada, e consistiam em drenagem de terrenos e instalação de chafarizes. A coleta de lixo, por sua vez, era responsabilidade de cada família (SOUZA, 2009).

Quase 60 anos depois da perfuração do primeiro poço, em 1620 o povo carioca viu serem iniciadas as obras do aqueduto do Rio Carioca para abastecimento do Estado do Rio de Janeiro – uma estrutura que contemplava um sistema de adução com 270 metros de comprimento e 17,6 metros de altura. No entanto, foi somente em 1723 que a referida obra foi concluída, constituindo o primeiro sistema de abastecimento de água no Brasil.

Ainda que a passos lentos, as preocupações com o saneamento continuaram existindo no Brasil, e em 1863 o engenheiro inglês James Brunless foi nomeado para elaborar um plano geral para abastecimento de água e coleta e disposição de esgoto para a cidade de São Paulo. Já no Rio de Janeiro, no ano seguinte, foi concluída a instalação da primeira rede de esgoto da capital (AZEVEDO NETTO, 1959), no entanto, ainda sem ser conjugada ao abastecimento de água, tal como previa o plano geral de Brunless para a cidade de São Paulo.

Os registros listados acima denunciam o fato de que, embora tenham sido realizadas obras de abastecimento de água e esgotamento sanitário, as populações contempladas eram somente aquelas que habitavam grandes centros urbanos. Em um país de dimensões continentais, a maior parte de seus habitantes ficou, portanto, de fora do alcance desses sistemas, o que fez com que serviços de infraestrutura, de água e de esgoto passassem a ser executados por meio de concessões à iniciativa privada (SILVA, 1998).

Ainda sem fugir dos grandes centros, em 1877 foi criada a Companhia Cantareira e Esgotos para explorar os serviços de abastecimento e esgotamento na cidade de São Paulo; tratava-se de uma empresa privada, que substituiu o abastecimento até então existente pelo modelo de ligações domiciliares de água. Foi também na capital paulista que, um ano depois, em 1878, foi construído o primeiro reservatório de água do local – atual reservatório da Consolação, iniciando a sua operação em 1882.

Em 1892, passados dez anos, o estado de São Paulo enfrentou uma grave crise de abastecimento. Tal crise, somada a problemas financeiros da Companhia Cantareira e à insatisfação do povo, fizeram com que o governo local estatizasse os serviços de saneamento e criasse a Repartição de Água e Esgotos (RAE). Neste momento, a responsabilidade de levar saneamento à crescente população da cidade passou para as mãos da chamada Província (SABESP, 2016).

O próximo marco, que merece destaque na construção desse breve histórico trata-se da criação, em 1942, do Serviço Especial de Saúde Pública (SESP), hoje denominado Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). Registra-se que entre os anos de 1938 e 1945, João de Barros Barreto, Diretor do Departamento Nacional de Saúde, teve papel protagonista nas políticas de saúde e saneamento básico do Brasil, fazendo com que o país se destacasse diante da Organização Pan-americana de Saúde (OPAS) e passasse a

fazer parte de acordos internacionais. Dentre essas inciativas estão os Acordos de Washington, firmados entre o Brasil e os Estados Unidos dando origem ao SESP, serviço que tinha como objetivo levar saneamento básico para as regiões brasileiras responsáveis pela produção de matérias primas estratégicas para a 2ª Guerra Mundial (LIMA, 2002).

O marco seguinte desse histórico data de 1967, quando foi criado o Banco Nacional da Habitação (BNH) para promover e financiar a expansão dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no país. Os recursos utilizados vinham do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS). Seguindo nessa linha de criação de iniciativas que pudessem fazer o país evoluir em termos de saneamento básico – aqui ainda não contemplando as atividades de limpeza e drenagem urbana, bem como o manejo de resíduos sólidos e de águas pluviais – em 1971 foi criado o PLANASA, um Plano Nacional de Saneamento que estipulava como meta ter, até o ano de 1980, 80% da população urbana brasileira com acesso a água potável, e 50% dessa mesma população atendida por sistemas de esgotamento sanitário. Tais iniciativas, no entanto, tiveram vida curta: em 1986 o BNH foi extinto, levando o PLANASA ao declínio e transferindo as ações de promoção do saneamento para a Caixa Econômica Federal (CEF).

Já adentrando nos anos 90, foi em 1993 que foi implementado o Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS). Tratava-se de um projeto piloto centrado na modernização do setor de saneamento, na melhoria da eficiência e no aumento da capacidade de financiamento da prestação de serviços. Foi somente 14 anos depois, no entanto, que foi instituída a Lei nº 11.445, citada na abertura desse texto e que é considerada pelos estudiosos da área como um marco regulatório para o setor, uma vez que estabeleceu diretrizes nacionais e princípios para a universalização do acesso ao saneamento.

Foi somente com a referida Lei que, a partir de 2007, as atividades de limpeza e drenagem urbana, além de manejo de resíduos sólidos e de águas pluviais passaram a compor, no Brasil, a noção de Saneamento Básico, somando-se aos serviços prévios de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Com a mudança há uma maior garantia de ofertar estes serviços básicos à população brasileira, além de potencializar o seu planejamento integrado.

Em 2013, durante o primeiro mandato de Dilma Rousseff, foi criado o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), em voga até os dias atuais. Com o PLANSAB, foram estabelecidas metas progressivas de curto, médio e longo prazos – respectivamente para 2018, 2023 e 2033 – voltadas ao abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, coleta de lixo e manejo de resíduos sólidos, além de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Desde então, para o monitoramento das leis e diretrizes que embasam o Plano Nacional, o Brasil conta com a atuação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) – agência responsável pela implementação da gestão dos recursos hídricos e, com a promulgação da Lei nº 14.026/2020, passou a ser responsável pela uniformização da regulação do setor e divulgação de melhores práticas dos serviços públicos de saneamento básico –, e do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) – maior e o mais importante sistema de informação sobre saneamento no Brasil.

Passados dois anos desde a data prevista para o alcance da meta de curto prazo, houve a reformulação da LNSB através da publicação da Lei nº 14.026/2020, instituindo o chamado Novo Marco Legal do Saneamento. A partir desse Novo Marco, foi definido como meta de universalização que, até 31 de dezembro de 2033, 99% da população brasileira tenha cobertura de abastecimento de água potável, e 90% desses mesmos cidadãos tenham acesso à coleta e tratamento de esgoto (BRASIL, 2020).

Neste momento estamos, portanto, há pouco mais de 11 anos de distância da data prevista para o cumprimento da meta. No atual cenário, temos 84% da população brasileira abastecida de água potável, 55% com atendimento ao serviço de esgotamento, o que sugere que ainda há um longo caminho a ser percorrido. (SNIS, 2020).

Além desses indicadores, podemos destacar que 90% da população é atendida com coleta de resíduos sólidos, e apenas 45% dos municípios possui sistema exclusivo de drenagem das águas pluviais (SNIS, 2020).

Recentemente, no Rio de Janeiro (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2020a; 2020b), ocorreu a concessão dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, por meio de procedimento licitatório sob a modalidade de concorrência internacional, cujos titulares constituíram gestão associada com o estado. As empresas vencedoras dos processos licitatórios terão a concessão desses serviços por

35 anos, com o compromisso contratual de investir na ampliação dos sistemas de esgotamento sanitário e abastecimento de água.

Diante da necessidade urgente de reduzir os esgotos in natura lançados nos corpos hídricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro - RMRJ, o projeto de concessão prevê, conforme consta no Caderno de Encargos, a construção de coletores de esgoto de tempo seco nos 5 (cinco) primeiros anos do período de concessão, para os municípios de Belford Roxo, Duque de Caxias, Mesquita, Nilópolis, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Itaboraí, São Gonçalo e respectivos distritos. O sistema de coleta em tempo seco deverá interceptar o esgoto escoado através da galeria de água pluvial e direcioná-lo, após passar pelo gradeamento e desarenador, à estação de tratamento de esgoto (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2020a; 2020b).

Dessa maneira, a implantação do sistema, no curto prazo e de forma provisória, tem o objetivo de reduzir a poluição hídrica decorrente do lançamento de esgoto não tratado em galerias de águas pluviais, minimizar a poluição da Baía da Guanabara e afluentes, bem como do rio Guandu (principal manancial da RMRJ) e melhorar a balneabilidade das praias e lagoas. Em paralelo, as concessionárias dos serviços de esgotamento sanitário e abastecimento de água deverão investir na construção das redes separadoras absolutas.

Portanto, o projeto de concessão propõe iniciar a coleta em tempo seco, buscando resultados no curto prazo, sem deixar de lado os objetivos de médio e longo prazo, que consistem na universalização do esgotamento sanitário com o uso das redes separativas. O sistema de coleta em tempo seco poderá ser mantido, após a implantação de rede separadora absoluta, como redundância para captação da poluição difusa.

Com a implementação da coleta em tempo seco torna-se essencial o estudo integrado das redes coletoras de drenagem pluvial e esgotamento sanitário, a fim de avaliar a interação dessas redes e o impacto aos corpos hídricos receptores, com a entrada de esgoto na drenagem pluvial, assim como o impacto da drenagem no esgoto, diluindo os efluentes e apontando a necessidade do dimensionamento adequado do sistema de coleta em tempo seco e das estações de tratamento de esgoto.

Como demonstrado acima, a história da implementação do saneamento básico no Brasil não é linear e nem, tampouco, deixou de registrar eventos adversos, os quais dificultaram o processo ao longo dos anos. Dentre os principais obstáculos percebidos, temos a falta

de planejamento adequado, os insuficientes investimentos, as falhas na gestão das companhias de saneamento, além da baixa qualidade técnica de projetos e a dificuldade para obtenção de financiamentos e licenças para as obras necessárias à expansão e melhoria dos serviços prestados à população brasileira (EOS, 2017).

2.2 Sistema de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas

Segundo a Lei nº 11.445/2007 o sistema de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas é constituído "pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes" (BRASIL, 2007).

O sistema pode ser tratado na escala de macrodrenagem e de microdrenagem. A macrodrenagem é composta por rios, córregos, canais e grandes galerias. A microdrenagem nasce pós urbanização e, é formada pelos loteamentos e áreas públicas que transportam suas águas escoadas em direção à uma rede principal de macrodrenagem. Fazem parte dela as ruas, sarjetas e galerias, por exemplo.

Tendo em vista este conceito de escala de interesse, podemos partir ao necessário para o desenvolvimento de um adequado projeto de manejo de águas pluviais. Ponce e Simons *et al*. (1977) destaca que fazem parte deste projeto as medidas estruturais e não-estruturais.

As medidas estruturais são alterações diretas nos elementos da drenagem urbana. A Tabela 2-1 mostra as principais medidas estruturais estabelecidas por Ponce e Simons et al. (1977), assim como suas principais vantagens, desvantagens e aplicações.

Tabela 2-1. Medidas estruturais (Ponce e Simons *et al*. 1977)

Medida	**Vantagem**	**Desvantagem**	**Aplicação**
Medidas extensivas:			
Cobertura Vegetal	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes áreas	Pequenas Bacias
Controle de perda	Reduz assoreamento	Impraticável para grandes áreas	Pequenas Bacias
Medidas intensivas:			
Diques e pôlderes	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhe	Grandes Rios
Melhoria do canal:			
Redução da rugosidade por desobstrução	Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
Corte de meandro	Amplia a área protegida e acelera o escoamento	Impacto negativo em rio com fundo aluvionar	Área de inundação estreita
Reservatório:			
Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícil	Bacias intermediárias
Reservatório com comportas	Mais eficientes com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
Reservatórios para cheias	Operação com mínimos de perdas	Custo não partilhado	Restrito ao controle de enchentes
Mudança de canal:			
Caminho da cheia	Amortecimento de volumes	Depende da topografia	Grandes bacias
Desvios	Reduz vazão do canal principal	Depende da topografia	Bacias médias e grandes

Já as medidas não-estruturais procuram harmonizar a relação entre a cidade e os eventos de inundação. Fazem parte delas a preservação da cobertura vegetal, a regulamentação do uso do solo e zoneamento das áreas de inundação, construções à prova de inundações, seguro-inundações, sistema de previsão e alerta de inundações e educação ambiental.

2.2.1 Dimensionamento hidráulico do sistema de drenagem

Em um viés tradicional, o dimensionamento de uma rede de drenagem de águas pluviais urbanas parte da subdivisão da área de estudo em sub-bacias e traçado da rede, que deve ser lançada levando em conta os padrões de escoamento. A próxima etapa é a definição das vazões que aportam ao sistema a ser projetado, utilizando, por exemplo, do método racional, ou outra metodologia ser definida, em geral, pelo tamanho da área de contribuição. Após os primeiros passos citados é realizado o dimensionamento hidráulico da rede de condutos pluviais, foco do presente tópico.

Os dispositivos hidráulicos do sistema de drenagem são, em sua grande maioria, dimensionados a superfície livre. O dimensionamento a superfície livre se caracteriza pela presença de uma superfície em contato com ar a pressão atmosférica. A principal característica do escoamento a superfície livre está em que é a gravidade a principal força motriz do fluxo (NETTO, 2015).

A elevada deformabilidade entre a superfície da água em contato com o ar (a pressão atmosférica), somado à não homogeneidade das superfícies de contato entre a água e as paredes e o fundo das canalizações, elevam o grau de complexidade das equações a superfície livre.

Levando em conta que as dimensões longitudinais dos dispositivos hidráulicos de drenagem são mais significativas que as variações em largura e na profundidade, pode-se considerar que o dimensionamento deste sistema é um problema unidimensional.

Além disso, este escoamento está sujeito a alterações ao longo do espaço e tempo (MIGUEZ *et al.*, 2016). Nos casos em que as variações temporais podem ser desconsideradas, o escoamento é chamado de permanente. Quando podem ser desconsideradas as variações no espaço, o escoamento pode ser tratado como escoamento uniforme, para este caso, considera-se que a declividade da linha de energia e da superfície livre é paralela ao fundo.

Apesar do escoamento permanente e uniforme em cursos d'água não existir na natureza, esta representação é uma simplificação que pode apresentar erros aceitáveis para dimensionamento hidráulico de diversos problemas (NETTO, 2015). O uso

indiscriminado desta simplificação, por outro lado, pode gerar mal dimensionamento do sistema de drenagem, tornando mais recorrentes suas falhas.

Quando há variações no espaço, diz-se que o escoamento é variável, podendo ser ainda caracterizado como gradualmente variado (Ex.: curvas de remanso) ou bruscamente variado (Ex.: ressalto hidráulico).

As equações que representam o escoamento em canalizações e rios podem ser deduzidas pela aplicação dos princípios básicos de quantidade de movimento e conservação de massa. Assim, são apresentadas as equações de Saint-Venant que representam a Equação Dinâmica (Equação 2-1), e a Equação da Continuidade (Equação 2-2) para escoamentos unidimensionais transientes a superfície livre.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = ql \qquad \text{Equação 2-1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} = g\left(S_0 - S_f\right) \qquad \text{Equação 2-2}$$

Nas quais:
Q – Vazão
x – distância da seção transversal
A – área da seção transversal
t – tempo
ql – contribuição lateral por unidade de largura
h – altura da seção transversal
S_0 – declividade do fundo
S_f – declividade da linha de energia devido à resistência
g – aceleração da gravidade

Para o regime permanente e uniforme, desconsiderando todas as variações no tempo e no espaço, obtém-se que ql=0 (não pode haver contribuição lateral) e que $S_0 = S_f$, confirmando a premissa anteriormente apresentada que a declividade da linha de energia e da superfície livre é igual à declividade do fundo.

Desta forma, a Equação de Manning, uma das expressões mais comuns para discretizar um escoamento a superfície livre, desenvolvida de forma empírica inicialmente para S_f, pode ser escrita para o regime permanente e uniforme conforme apresentado na Equação

2-3. Esta equação é recomendada em diversas bibliografias tanto para o dimensionamento dos sistemas de macrodrenagem, quanto para o de microdrenagem (MIGUEZ *et al*., 2016; NETTO, *et al*. 2015). Além disso, o manual de instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana (RIO-ÁGUAS, 2019) do município do Rio de Janeiro apresenta esta equação como principal forma de dimensionamento.

$$Q = \frac{1}{n} A {R_H}^{2/3} S_0^{1/2} \qquad \text{Equação 2-3}$$

Na qual:
Q: vazão;
n: Coeficiente de Manning;
A: área molhada da seção transversal;
R_H: raio hidráulico;
S_0: declividade de fundo.

Vale destacar algumas recomendações técnicas apresentadas pela Rio-Águas (2019) para o dimensionamento de sistemas de drenagem. O manual apresenta mais recomendações do que as apresentadas a seguir, porém, foram compiladas somente as mais pertinentes para o presente trabalho.

- Para galerias fechadas recomenda-se velocidade máxima de 5,0 m/s e velocidade mínima de 0,8 m/s.
- É prevista a contribuição de tempo seco, originada pela vazão de base da bacia hidrográfica e por possíveis contribuições do sistema de esgotamento sanitário. Neste caso, a vazão a ser adotada deverá estar na faixa de 1,0% a 3,0% da vazão de projeto para o TR de 10 anos.
- Em relação ao recobrimento das galerias circulares de drenagem, o manual indica que seja respeitado metade do diâmetro mais 40 centímetros. Caso não seja possível respeitar tal recobrimento, poderá ser utilizado reforço sob o pavimento para a proteção da galeria.
- No que tange a transposição de interferências, o manual prevê uma folga mínima de 20 centímetros entre as geratrizes externas e o objeto a ser transposto.
- Os diâmetros comerciais em metros indicados pelo manual são: 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00; 1,20; 1,50; 1,80; 2,00.

- Galerias que transportem vazões maiores que 10,0 m³/s não poderão ser fechadas, ser devendo ser dimensionados canais abertos.
- Finalmente, o manual destaca que o espaçamento entre poços de vista (PV) para sistemas de drenagem deverá ser entre 30 e 40 metros, independentemente do diâmetro da tubulação dimensionada.

2.2.2 Sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS – *Sustainable Urban Drainage Systems*)

O conjunto de boas práticas utilizadas no manejo das águas urbanas pode ser chamado de Sistema de drenagem urbana sustentável (SUDS), o qual é projetado de maneira a permitir a infiltração da água no solo ou sua retenção em dispositivos, na tentativa de reproduzir a disposição natural das águas superficiais. Dentre os objetivos dos SUDS destacam-se: o controle quantitativo do escoamento superficial; melhoria da qualidade da água do escoamento superficial; conservação das características naturais dos corpos d'água; e o balanço das variáveis hidrológicas na bacia hidrográfica (CHARLESWORTH *et al*., 2003; POLETO & TASSI, 2012). De modo geral, o sistema de drenagem urbana sustentável busca retomar as características e condições naturais do ciclo hidrológico antes da urbanização (OLIVEIRA *et al*., 2017).

Ademais, esses sistemas são construídos para gerir os riscos ambientais resultantes do escoamento superficial e contribuir, na medida do possível, com o aprimoramento ambiental. Segundo Woods et al. (2007) os objetivos dos SUDS abrangem a minimização dos impactos decorrentes da qualidade/quantidade do escoamento superficial e maximização da comodidade e biodiversidade.

A seguir são apresentados os elementos básicos de projetos de SUDS, publicados pela *Construction Industry Research and Information Association*, no ano de 2007:

- Faixas de filtração
- Valas de infiltração
- Bacias de infiltração
- Bacias de retenção
- Bacias de detenção
- Charcos artificiais
- Trincheiras de filtração
- Dispositivos de infiltração
- Pavimentos permeáveis
- Telhados verdes

O tratamento da drenagem urbana, a partir deste novo sistema, visa substituir as grandes estruturas dos projetos de controle de inundações convencionais, por pequenas medidas espalhadas por toda a bacia hidrográfica, atuando na fonte da geração do escoamento.

Deste modo, a prática de coleta e disposição das águas pluviais, o mais rápido possível, tem dado lugar a aplicação de tecnologias mais abrangentes, capazes de reduzir o pico de inundação, controlar a poluição e melhorar a comodidade (ARGUE & PEZZANITI, 1999). Os SUDS focam em decisões que levam em consideração o efeito do projeto e manutenção do sistema de drenagem na qualidade no meio ambiente receptor, bem como na vida da população. Este conceito pode ser dividido em três amplos grupos, com os seguintes objetivos (CHARLESWORTH *et al*., 2003):

1. Reduzir a quantidade de escoamento do local (técnicas de controle de origem);
2. Diminuir a velocidade do escoamento, permitindo infiltração (sistemas de transporte permeáveis);
3. Promover um tratamento passivo para coletar a água superficial antes de sua descarga no solo ou curso d´água (fim dos sistemas de tubulação).

Os sistemas de drenagem sustentáveis oferecem benefícios que o sistema convencional não abrange, tais como: proteção e melhoria da qualidade da água e biodiversidade nos cursos d'água urbanos; proteção da população e de propriedades contra inundações; e minimização da utilização dos recursos naturais, permitindo que as operações a longo prazo sejam adaptáveis para requerimentos futuros (CHARLESWORTH *et al*., 2003).

2.2.3 Drenagem Urbana e os espaços livres

Em relação ao setor de manejo de águas pluviais, o principal déficit diagnosticado na avaliação da estrutura do setor de drenagem urbana se refere às falhas de funcionamento do sistema que geram inundações. As inundações, por sua vez, podem ser vistas como um problema de alocação de espaço. Ao utilizar áreas que deveriam ser preservadas para inundação e fomentar um uso do solo que gera uma quantidade maior de escoamentos, o processo de urbanização deveria prever novos e alternativos espaços para a armazenagem temporária dos escoamentos, de modo a permitir a continuidade do funcionamento do sistema de drenagem.

O sistema de drenagem é parte das redes de infraestrutura. Entretanto, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, conhecida como a Lei de Saneamento de 2007, veio, de certa forma, quebrar este paradigma rígido. Esta lei definiu a drenagem e o manejo de águas pluviais urbanas como peças indispensáveis do saneamento básico já que não se refere apenas a infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte e disposição final que compreendem as atividades tradicionais deste sistema, mas também prevê a detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias e o seu tratamento como elementos do sistema. Mais recentemente, alterando a Lei de Saneamento de 2007, a Lei nº 13.308, de 6 de julho de 2016, prevê a disponibilidade, em todas as áreas urbanas, de serviços de drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes.

Uma situação de drenagem urbana sustentável implica que sistemas de drenagem urbana devem ser planejados de forma integrada com o crescimento urbano, com a demanda de que soluções de drenagem sejam agregadas com a paisagem urbana (MIGUEZ *et al*., 2016).

Para tanto, é necessária uma visão sistêmica e integrada. Tal abordagem deve avaliar a cidade de forma a associar questões ambientais e infraestrutura urbana, reavaliar políticas públicas com relação ao uso e ocupação do solo e buscar a adoção de padrões urbanísticos adequados para a mitigação ou prevenção do risco de inundação.

Foi percebido que grandes espaços livres naturais podem reduzir de forma mais eficaz os danos gerados pelas inundações em comparação à espaços livres fragmentados e pequenos. Remendos naturais únicos e grandes podem fornecer caminhos para as águas

pluviais e serem grandes o suficiente para funcionar como áreas de armazenamento do volume não captado pelos cursos d'água. Resultados que coincidem com as recomendações que permeiam a literatura sobre a manutenção da biodiversidade e função do ecossistema (DRAMSTAD, OLSON, & FORMAN, 1996; PECK & SHEILA, 1998).

Há um grande potencial de solução quando passamos a observar os espaços livres como um sistema multifuncional capaz de tanto trabalhar para o manejo de águas pluviais, oferecendo um volume de armazenamento para o sistema de drenagem, quanto como espaços de lazer e recreação. Assim, estes espaços livres podem ser utilizados também como reservatórios de amortecimento, diminuindo os picos de vazão nos eventos extremos, ou como reservatórios de retenção, com lagos permanentes, além de aumentar as oportunidades de infiltração retirando parte da água do sistema e devolvendo aos reservatórios do solo, além de oferecer a possibilidade de melhoria na qualidade da água.

2.2.4 Falhas do Sistema de Drenagem e seus impactos

Tanto o sistema de macrodrenagem urbana como o sistema de microdrenagem são dimensionados para determinados tempos de recorrência, ou seja, desde sua concepção é esperado que para certos eventos de chuva as estruturas hidráulicas e os cursos d'água não sejam capazes de manter os fluxos de água dentro da sua capacidade e a vazão para a qual foram projetados seja excedida, falhando e inundando áreas da cidade não adaptadas para estas falências e atingindo, em geral, pessoas sem a percepção real do risco de inundação (ARMAS & AVRAM, 2009 ; BRILLY, 2005 ; BOTZEN, 2009).

A nomenclatura em relação às falhas do sistema de drenagem possui diversas interpretações e, na maioria das vezes, é confundida com diversos conceitos do ciclo hidrológico das bacias hidrográficas. Dessa forma, o presente trabalho utilizará uma nomenclatura baseada nas interpretações dos conceitos de SEMADS (2001), Valente (2009), São Bernardo do Campo (2011) e Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), proposta em 2012 (BRASIL, 2012) sendo:

Enchente: Parte integrante do ciclo da água na natureza na qual os escoamentos superficiais das águas decorrentes de chuvas fortes aumentam a vazão de um determinado curso d'água.

Vazante: Parte integrante do ciclo da água na natureza na qual ocorre a recessão das vazões de enchente.

Cheia: Período que engloba a enchente e a vazante de um determinado rio. A cheia não necessariamente gera inundações.

Inundações: Volume de água da cheia que ultrapassa a capacidade hidráulica do curso d'água. "Submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície" (BRASIL, 2012)

Alagamentos: Acúmulos de água pela cidade ocasionados por falhas na rede de microdrenagem. "Extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas [...]" (BRASIL, 2012)

Enxurradas: Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), as também chamadas inundações bruscas passaram a ser denominadas enxurradas e são definidas como escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracteriza-se pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial. (BRASIL, 2012). A Figura 2-1 apresenta de forma esquemática e qualitativa a aplicação da nomenclatura adotada para um hidrograma padrão de determinada seção de um rio.

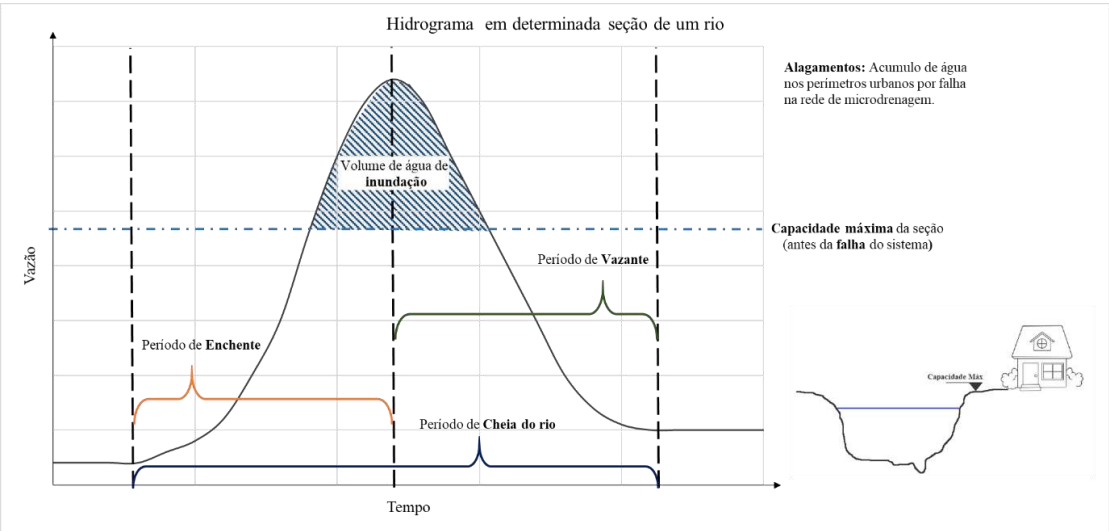

Figura 2-1 – Nomenclatura base para as falhas no sistema de drenagem urbana. Fonte: Autor.

As falhas no sistema de drenagem urbana, por sua vez, são potenciais geradoras de danos e perdas à cidade. Segundo World Bank (2013) e Hechtman (2014) a deterioração do patrimônio físico está relacionada aos danos ocasionados pelos desastres naturais, enquanto modificações no valor da prestação de serviços essenciais, despesas e rendas está associada às perdas trazidas pelos eventos de desastre.

Em outra linha de classificação dos impactos negativos trazidos pelas falhas da rede de drenagem, Handmer (1986) classifica os danos causados pelas inundações em tangíveis e intangíveis e em diretos e indiretos. A primeira classificação diz respeito à complexidade em quantificar financeiramente os danos causados pela inundação e a segunda classificação diz respeito ao deterioramento: direto - pela exposição dos bens em questão às águas pluviais; ou indireto - por qualquer perda não ocasionada pela exposição direta às águas pluviais.

Eventos de chuva extrema podem atingir as redes de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. O impacto no sistema de abastecimento de água pelo excesso de chuvas tende a intensificar os processos erosivos e de lixiviação, gerando aumento da turbidez e consequente comprometimento da produção de água tratada pelas ETA's (estações de tratamento de água). Em casos mais extremos, estruturas de vertimento de reservatórios podem ser superados e barragens podem ser galgadas, comprometendo suas estruturas. O impacto no sistema de esgotamento sanitário ocorre pelas chamadas conexões parasitas, que contribuem com águas pluviais para as redes de esgotamento, assim, a capacidade hidráulica, já excedida em muitos casos, pela pressão do crescimento urbano, apresenta um cenário pior, pelos eventos pluviométricos extremos. Extravasamentos das redes de esgotamento se tornam mais frequentes, contaminando áreas, prejudicando a saúde pública e a qualidade da água dos corpos hídricos (GOITIA, 2011).

O Banco Mundial (2012a, 2012b, 2012c, 2012d) cita possíveis danos das inundações sobre as redes de distribuição de água impactando represas, reservatórios, tanques de armazenamento, água mineral não engarrafada, estações de tratamentos de água danificadas ou destruídas. Em relação às perdas, são apresentadas a mão-de-obra necessária para recuperar a rede de distribuição e os gastos em distribuição emergencial por carro-pipa.

Em relação aos danos na rede de coleta de esgotos por eventos de inundação são citados a manutenção das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e a destruição ou danificação das redes. Há também as perdas trazidas pela necessidade de recuperar as redes de esgotamento sanitário (BANCO MUNDIAL 2012a, 2012b, 2012c, 2012d). Para o setor de resíduos sólidos o Banco Mundial (2012a, 2012b, 2012c, 2012d) considera perdas na remoção de lixo não coletado e não tratado que foi espalhado pela cidade no decorrer do evento de inundações. Vale destacar que as inundações podem atingir o próprio sistema de drenagem urbana, destruindo ou danificando sistemas de drenagem, galerias, canais, entre outras estruturas de drenagem, pelo excesso de volume de água pluvial escoado (BANCO MUNDIAL 2012a, 2012b, 2012c, 2012d).

2.3 Sistema de Esgotamento Sanitário

Segundo a Lei nº 11.445/2007 o Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) é "constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias à coleta, ao transporte, ao tratamento e à disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até sua destinação final para produção de água de reuso ou seu lançamento de forma adequada no meio ambiente" (BRASIL, 2007).

Há, porém, diversas formas adequadas de realizar a coleta, o transporte, o tratamento e a disposição final do esgotamento sanitário. Em relação à classificação dos diversos métodos de como lidar com o SES podemos destacar as publicações de Tsutiya e Alem Sobrinho, (2000) e de Artina *et al*. (1997).

Para Tsutiya e Alem Sobrinho (2000) e para outros autores (ASCE-WPCF, 1982) o SES pode ser classificado nos seguintes grupos:

- SES separador absoluto (SSA). Este sistema é projetado considerando a contribuição de águas residuais e de águas de infiltração;
- SES combinado ou unitário (SU). Este sistema é projetado considerando a contribuição de águas residuais, de águas de infiltração e de águas pluviais;
- SES separador parcial (SSP). Este sistema é projetado considerando a contribuição de águas residuais, de águas de infiltração, e de águas pluviais, porém, estas últimas oriundas de telhados e pátios;
- SES misto (SM). Este sistema é inicialmente concebido para receber contribuições de águas residuais e de águas de infiltração, porém, na prática, a partir de contribuição irregulares, recebe também a contribuição de águas pluviais. É considerado SM também a contribuição contrária, na qual o sistema de drenagem urbano recebe a contribuição irregular de águas residuais.

Por outro lado, a classificação de Artina *et al*. (1997) realiza uma divisão do SES nos seguintes 5 grupos, sob a ótica, também, do sistema de drenagem:

- SES separador absoluto convencional. O SES é direcionado para uma estação de tratamento e o sistema de drenagem é direcionado diretamente no corpo hídrico receptor;
- SES separador com desvio. Os fluxos encontrados em tempo seco no sistema de drenagem (lançamentos irregulares de águas residuais) somados a uma parcela de

fluxos combinados são direcionados ao SES e, posteriormente, à estação de tratamento. Radesca (2018) destaca que esta vazão incremental em tempo seco deve ser calculada levando em conta a capacidade das redes e da estação de tratamento do SES;

- SES separador com desvio e reservatório. Esta classificação é similar à anterior, porém, há um reservatório intermediário que armazena parte dos fluxos desviados. As estruturas de armazenamento servem para controlar as vazões das águas desviadas e não comprometer as redes e a estação de tratamento do SES;
- SES unitário com extravasor. Nesta classificação as águas residuais e uma parcela das águas pluviais são direcionadas conjuntamente para a estação de tratamento. O extravasor é demandado em eventos de pluviosidades extremas, quando a estação de tratamento tem sua capacidade excedida. Sendo assim, as águas combinadas aportam diretamente ao corpo hídrico receptor;
- SES unitário com extravasor e reservatório. Nesta classificação, assim como na anterior, as águas residuais e uma parcela das águas pluviais são direcionadas conjuntamente para a estação de tratamento. Porém, nesta lógica, o extravasor contribui para um reservatório que armazena o excesso dos fluxos combinados e regula o aporte de vazões para a estação de tratamento. Assim, são mitigados os extravasamentos ao corpo hídrico receptor.

Em relação ao tipo de SES utilizado no Brasil, vale destacar que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) normatizou o sistema do tipo separador absoluto através da NBR 9648/86 (Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário - Procedimento) (ABNT, 1986a) e da NBR 9649/86 (Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário) (ABNT, 1986b). Diante disso, legalmente, é necessário adotar este tipo de sistema para lograr o licenciamento ambiental.

Esta normatização limita o tipo de solução a ser adotada em um país com dimensões continentais, no qual diversas especificidades climáticas, topográficas, sociais ou culturais poderiam demandar outro tipo de solução. Além disso, corrobora com o surgimento de SES misto, no qual a combinações entre as redes de drenagem e de esgoto em um sistema não preparado para esta interação.

Porém, avanços neste sentido vêm sendo observados e segundo a Lei Metropolitana do Rio de janeiro, há o reconhecimento do sistema de tempo seco como estratégia para a

ofertar de maneira abrangente e eficiente o serviço de esgotamento sanitário. Adicionalmente, o novo marco do saneamento (Brasil, 2020) apresenta uma definição de esgotamento sanitário que não inclui apenas esgotos nas redes, definindo o SES do tipo Unitário como conjunto de condutos, instalações e equipamentos destinados a coletar, transportar, condicionar e encaminhar conjuntamente esgoto sanitário e águas pluviais.

Vale destacar que a escolha pelo tipo de SES deve ser realizada levando em conta características específicas do local estudado. Diante dos principais pontos a serem analisados, destaca-se o estudo financeiro para viabilidade de implementação e operação e manutenção do sistema, o grau de tratamento requerido para proteção dos corpos hídricos receptores, além da análise de adesão da solução pela população. A Figura 2-2 apresenta o fluxograma proposto por Bernardes e Soares (2004) e adaptado por Madeira (2012) para identificação da solução mais adequada para o SES.

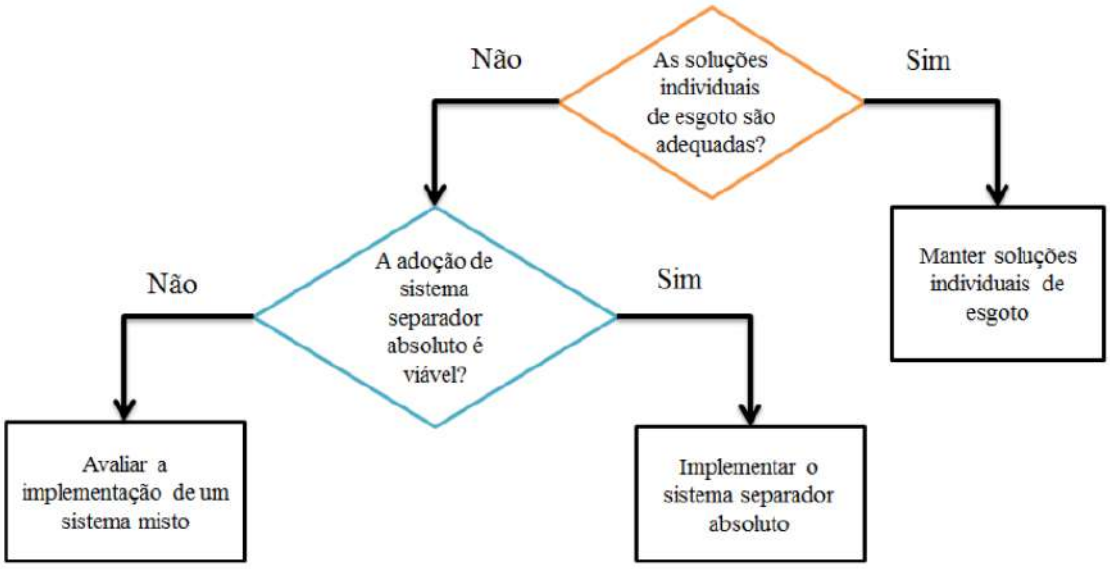

Figura 2-2. Fluxograma de identificação da situação do sistema de esgotamento.
Fonte: Madeira (2012), adaptado de Bernardes; Soares (2004)

Os tópicos a seguir exploram os principais SES coletivos, o sistema separador absoluto e o sistema unitário.

2.3.1 Dimensionamento hidráulico do sistema de esgotamento separador absoluto

O dimensionamento de redes coletores de esgotos sanitários utiliza a fórmula de Manning para os cálculos hidráulicos em condutos livres, salvo que não é uma regra universal. Salienta-se ainda, que os parâmetros de rugosidade e auto limpeza dos condutos são geralmente utilizados baseando-se em valores fixo, os quais acabam não levando em consideração a sinergia dos parâmetros físicos e hidráulicos em situações reais operacionais: biofilme, sedimentos, obstáculos (COELHO, 2020). Ainda segundo esse autor, "os critérios de rugosidade e auto limpeza dos condutos são baseados em valores fixos que geralmente não consideram a sinergia dos parâmetros físicos e hidráulicos em situações reais operacionais: biofilme, sedimentos, obstáculos".

No Brasil, os critérios para tal dimensionamento são, basicamente, os da NBR 9649 (ABNT, 1986b). O método consiste em se passar uma vazão determinada para cada trecho da rede, em condutos circulares, e determinar, através de parâmetros geométricos e hidráulicos, a declividade e o diâmetro mínimos de cada trecho da rede, adotando-se, inclusive, critério de auto limpeza por meio do parâmetro Tensão Trativa.

Recentemente, uma nova metodologia de cálculo foi sugerida por Coelho (2020), que propôs a inclusão do transporte de sedimentos e a formação de biofilme nas paredes da tubulação, o que não é considerado pela Norma. O autor analisou 168 fórmulas de dimensionamento hidráulico e 133 fórmulas de transporte de sedimentos para critério de auto limpeza.

Como o método normativo é amplamente utilizado, e dada a recente proposta do novo método, sem aplicação ainda nos projetos no Brasil, as diretrizes da NBR 9649 serão utilizadas como parâmetros para este trabalho. Essas diretrizes são adotadas, inclusive, nos softwares de dimensionamento de redes de esgoto utilizados pelos projetistas brasileiros.

Além da NBR 9649, outras normas brasileiras são também utilizadas para a concepção, o traçado, os materiais utilizados na execução da rede e os métodos de execução. Tais normas se encontram listadas na Tabela 2-2.

Tabela 2-2. Normas brasileiras relativas a sistemas de esgotamento sanitário (ABNT, 2022).

Norma	Título	Ano
NBR 12207	Projeto de interceptores de esgoto sanitário	2016
NBR 12587	Cadastro de sistema de esgotamento sanitário - procedimento	1992
NBR 14208	Sistemas enterrados para condução de esgotos - tubos e conexões cerâmicos com junta elástica - requisitos	2005
NBR 14486	Sistemas enterrados para condução de esgoto sanitário - projeto de redes coletoras com tubos de PVC	2000
NBR 15420	Tubos, conexões e acessórios de ferro dúctil para sistemas de esgotamento sanitário - requisitos e métodos de ensaio	2022
NBR 15536-1	Sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais - tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro (PRFV) - parte 1: tubos e juntas para adução de água	2007
NBR 15536-2	Sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais - tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro (PRFV) - parte 2: tubos e juntas para coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e água pluviais	2007
NBR 15536-3	Sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais - tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro (PRFV) - parte 3: conexões	2007
NBR 15536-4	Sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e plástico pluviais - tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro (PRFV) - parte 4: anéis de borracha	2007
NBR 15561	Tubulação de polietileno PE 80 e PE 100 para transporte de água e esgoto sob pressão — requisitos	2017
NBR 15645	Execução de obras utilizando tubos e aduelas pré-moldados em concreto	2020
NBR 15750	Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão — requisitos e métodos de ensaios	2020
NBR 15802	Sistemas enterrados para distribuição e adução de água e transporte de esgotos sob pressão — requisitos para projetos em tubulação de polietileno PE 80 e PE 100 de diâmetro externo nominal entre 63 mm e 1600 mm	2010
NBR 15803	Sistemas enterrados para distribuição e adução de água e transporte de esgoto sob pressão - requisitos para conexões de compressão para junta mecânica e tês de serviço para tubulação de polietileno (PE) até de 160 mm e de PVC PBA até DN 100	2022
NBR 15950	Sistemas para distribuição e adução de água e transporte de esgotos sob pressão — requisitos para instalação de tubulação de polietileno PE 80 e PE 100	2011
NBR 15952	Sistemas para redes de distribuição e adução de água e transporte de esgotos sob pressão — verificação da estanqueidade hidrostática em tubulações de polietileno	2011

Tabela 2 2. Normas brasileiras relativas a sistemas de esgotamento sanitário (Continuação) (ABNT, 2022).

Norma	Título	Ano
NBR 15953	Sistemas de tubulação plástica para abastecimento de água, drenagem e esgotos sob pressão - conexões soldáveis de polietileno (PE)	2022
NBR 15979	Sistemas para distribuição e adução de água e transporte de esgotos sob pressão — requisitos para reparo de tubulação de polietileno PE 80 e PE 100	2011
NBR 16085	Poços de visita e inspeção pré-moldados em concreto armado para sistemas enterrados — requisitos e métodos de ensaio	2020
NBR 16682	Projeto de linha de recalque para sistema de esgotamento sanitário - requisitos	2018
NBR 17015	Execução de obras lineares para transporte de água bruta e tratada, esgoto sanitário e drenagem urbana, utilizando tubos rígidos, semirrígidos e flexíveis	2022
NBR 5645	Tubo cerâmico para canalizações	1990
NBR 5688	Tubos e conexões de PVC-U para sistemas prediais de água pluvial, esgoto sanitário e ventilação - Requisitos	2018
NBR 7362-1	Sistemas enterrados para condução de esgoto - parte 1: requisitos para tubos de pvc com junta elástica	2005
NBR 7362-2	Sistemas enterrados para condução de esgoto - parte 2: requisitos para tubos de pvc com parede maciça	1999
NBR 7367	Projeto e assentamento de tubulações de PVC rígido para sistemas de esgoto sanitário	1988
NBR 7369	Junta elástica de tubos de PVC rígido coletores de esgoto - verificação do desempenho	1988
NBR 7665	Sistemas de transporte de água ou de esgoto sob pressão — tubos de PVC-M DEFoFo com junta elástica — requisitos	2020
NBR 7968	Diâmetros nominais em tubulações de saneamento nas áreas de rede de distribuição, adutoras, redes coletoras de esgoto e interceptores - padronização	1983
NBR 8890	Tubo de concreto de seção circular para água pluvial e esgoto sanitário - requisitos e métodos de ensaios	2020
NBR 9054	Tubo de PVC rígido coletor de esgoto sanitário - verificação da estanqueidade de juntas elásticas submetidas à pressão hidrostática externa - método de ensaio	1985
NBR 9055	Tubo de PVC rígido coletor de esgoto sanitário - verificação da estanqueidade de juntas elásticas submetidas ao vácuo parcial interno - método de ensaio	1985
NBR 9648	Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário - procedimento	1986
NBR 9649	Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário - procedimento	1986
NBR 9651	Tubo e conexão de ferro fundido para esgoto - especificação	1986

Os principais parâmetros verificados no dimensionamento das redes coletoras de esgotamento sanitário, segundo a NBR 9649 (ABNT, 1986b) são:

i. “Para todos os trechos da rede devem ser estimadas as vazões inicial e final (Qi e Qf). Inexistindo dados pesquisados e comprovados, com validade estatística, recomenda-se como o menor valor de vazão 1,5 L/s em qualquer trecho”. Na prática, não se têm os tais dados com validade estatística e é comum que os projetistas adotem o valor de 1,5 L/s como o mínimo para cada trecho. Assim, se a vazão calculada for inferior a este valor, a vazão de projeto do trecho fica sendo de 1,5 L/s;

ii. “Os diâmetros a empregar devem ser os previstos nas normas e especificações brasileiras relativas aos diversos materiais, o menor não sendo inferior a DN 100”. Essa recomendação normativa varia de acordo com a concessionária local. Em algumas cidades cuja concessionária é a Águas do Brasil, por exemplo, o diâmetro mínimo é de 150mm (ÁGUAS DO BRASIL, 2022);

iii. “A declividade de cada trecho da rede coletora não deve ser inferior à mínima admissível calculada de acordo com 5.1.4 e nem superior à máxima calculada segundo o critério de 5.1.5”. Essa recomendação também pode variar de acordo com a concessionária ou órgão a quem compete a aprovação do projeto. Para a Águas do Brasil (2022), os valores de declividade mínima dependem do diâmetro da tubulação, sendo de 0,5% para tubos até 200mm e de 0,3% para tubos com diâmetro superior a 200mm;

iv. “Cada trecho deve ser verificado pelo critério de tensão trativa média de valor mínimo σt= 1,0 Pa, calculada para vazão inicial (Qi), para coeficiente de Manning n = 0,013”. Essa recomendação é para satisfazer o critério de autolimpeza da tubulação e evitar o acúmulo de esgoto e sedimentos nos trechos. Uma vez que a tensão trativa é a tensão capaz de fazer a massa de água entrar em movimento, vencendo assim a tensão superficial, valores abaixo de 1,0 Pa podem manter o esgoto estagnado dentro das tubulações. Caso isso ocorra, o projetista deve aumentar a declividade, fazendo com que a componente horizontal da força gravitacional também aumente, elevando-se também a tensão trativa;

v. “Para coeficiente de Manning diferente de 0,013, os valores de tensão trativa média e declividade mínima a adotar devem ser justificados”. Na prática, adota-se este valor para

Manning, uma vez que ele já está adequado para tubos de PVC usados, garantindo assim a tensão trativa necessária para as vazões de início e fim de plano;

vi. “A máxima declividade admissível é aquela para a qual se tenha vf= 5 m/s”. Assim, é necessário se verificar, para cada trecho, se a declividade não permite uma velocidade final maior do que este valor;

vii. “Quando a velocidade final vf é superior à velocidade crítica vc, a maior lâmina admissível deve ser 50% do diâmetro do coletor, assegurando-se a ventilação do trecho”. Assim, é necessário também verificar a velocidade crítica de cada trecho e comparar com a velocidade final. Se vf foi maior que vc, deve-se verificar se a lâmina d’água não é superior à metade do diâmetro. Caso seja, deve-se aumentar o diâmetro ou se reduzir a declividade (o que for mais econômico);

viii. “As lâminas d’água devem ser sempre calculadas admitindo o escoamento em regime uniforme e permanente, sendo o seu valor máximo, para vazão final (Qf), igual ou inferior a 75 % do diâmetro do coletor”. Portanto, a lâmina d’água é um parâmetro importante para garantir o escoamento e evitar que, dada a formação de gases dentro da rede pela decomposição dos esgotos desde a sua geração, ocorra pressurização em algum trecho, uma vez que o presente modelo é todo baseado em escoamento de condutos livres;

ix. “A distância entre PV, TIL ou TL consecutivos deve ser limitada pelo alcance dos equipamentos de desobstrução”. Ou seja, cabe à concessionária ou o operador do sistema indicar aos projetistas a distância máxima entre as singularidades da rede. Em algumas cidades cuja concessão é da Águas do Brasil, essa distância é de 100m (ÁGUAS DO BRASIL, 2022);

x. “O recobrimento não deve ser inferior a 0,90 m para coletor assentado no leito da via de tráfego, ou a 0,65 m para coletor assentado no passeio. Recobrimento menor deve ser justificado”. Esse parâmetro também depende das diretrizes locais. A concessionária Águas do Brasil adota para algumas cidades, o recobrimento mínimo é de 1,25m para assentamento no leito carroçável (ÁGUAS DO BRASIL, 2022).

2.3.2 Sistema de esgotamento sanitário unitário

No que se refere às principais cidades brasileiras, é comum verificar grandes falhas no sistema separador instalado, seja por subdimensionamento do sistema de drenagem existente, seja por ligações clandestinas de esgoto na rede de drenagem (Câmara Metropolitana do Rio de Janeiro, 2017). Há ainda, casos em que contribuições de instalações prediais "parasitas" contribuem com água pluvial para o sistema de esgotamento sanitário, sobrecarregando as redes não dimensionadas para essas vazões, caracterizando um sistema misto. Soma-se a estas dificuldades operacionais o risco de mudanças climáticas, que através de possíveis incrementos de volumes de água precipitados excedem a capacidade hidráulica e potencializam extravasamentos das redes de esgotamento.

No Estado do Rio de Janeiro esta realidade não é diferente e o sistema misto caracteriza a atual situação do Sistema de Esgotamento Sanitário dos principais centros urbanos.

Diante do apresentado, estruturas hidráulicas com capacidade de mitigação dos efeitos destas disfunções podem ser propostas para ambos os sistemas. Estas estruturas configuram soluções de sistemas mistos que não deveriam possuir contribuição entre si. Além disso, após a sua implementação, é possível caracterizar este novo sistema, com correções, como sistema de esgotamento sanitário do tipo unitário, uma vez que leva em conta o funcionamento conjunto dos sistemas de águas pluviais e esgotos, apesar de não ter sido inicialmente pensado para isso.

Há no mundo diversos exemplos do funcionamento adequado do SES unitário como alternativa para melhoria da oferta dos serviços de saneamento básico. Orsini (2011) no âmbito da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) apresenta dois principais casos de sucesso da implementação deste tipo de solução. O autor cita que na cidade de Milão, na Itália, até o ano de 2002 todos os esgotos domésticos contribuíam in natura para os corpos d'água receptores. Com a implementação de uma multa sobre o poluidor a cidade teve que agir no desenvolvimento de um SES funcional para resolver esta questão. A primeira medida foi a implementação de um sistema separador absoluto, porém, dadas as características da cidade e necessidade de maior brevidade, a solução apresentou-se inadequada. Dessa maneira, o SES do tipo unitário se apresentou como solução, na qual o sistema existente foi consolidado, adaptado e melhorado. O autor destaca que a solução

teve impactos significativos e os esgotos domésticos passaram a ser tratados em sua integridade não impactando os corpos hídricos receptores.

Conforme apresentado pelo IRM (2017), algo simular ocorreu na França, onde o poluidor responsável pelo despejo de esgoto domiciliar, foi entendido como sendo o prestador do serviço de esgotamento sanitário. Neste caso, porém, o operador compartilhou a responsabilidade pela poluição com todos os usuários do sistema que não pagavam pelo serviço e não apresentavam soluções individuais.

O segundo caso de sucesso apresentado por Orsini (2011) está localizado na cidade de Seul, na Coréia do Sul. O rio Cheong, um dos principais casos de sucesso de requalificação fluvial e incorporação de cursos d'água na paisagem urbana teve, em sua bacia hidrográfica, a incorporação de um SES do tipo unitário. A bacia densamente ocupada do rio teve a implementação de um sistema unitário, baseado nas experiências italianas, e no prazo de 27 meses após o início das obras, o empreendimento foi inaugurado, sendo hoje uma das principais referências no tratamento das águas urbanas.

Pereira *et al*. (2020) destaca que diversos países europeus, como Portugal, França e Alemanha, adotaram o sistema de drenagem para a coleta de esgoto sanitário. Além disso os autores destacam que não há indícios de desativação desta forma de tratar o saneamento e, por outro lado, cada vez mais vem melhorando a operação destes sistemas para mitigar os efeitos de vazões poluentes para os corpos hídricos receptores.

Há no Brasil casos de sucesso pela implementação de sistemas unitários como apresentados na Baía Azul no estado da Baía, na Região dos Lagos no estado do Rio de Janeiro e no município do Rio de Janeiro, nos bairros de Copacabana e Ipanema (Pereira *et al*., 2020), apesar de não reconhecido. Em relação à Região dos Lagos, como destacado por Pereira (2014), foi possível alterar a eutrofização da Laguna de Araruama pela implementação de sistema unitário que atualmente trata cerca de 80% dos efluentes.

Porém, como destacado por Pereira *et al*. (2020) a falta de normas no Brasil no que diz respeito ao sistema unitário gera inseguranças e dificulta sua adoção e proposição nos planos e metas para o saneamento.

Em relação à tentativa de orientações técnicas para o dimensionamento de sistemas unitários destacam-se os trabalhos realizados pela Fundação Centro Tecnológico de

Hidráulica (FCTH) encontrados na publicação de Orsini (2011). Os tipos de Sistemas Unitários podem ser destacados de maneira sumarizada (Madeira, 2012) conforme apresentado a seguir:

a) não realizar tratamento, que é uma opção que não deve ser adotada, pois, causa grandes prejuízos ambientais;

b) tratar a vazão de esgotos sanitários e uma parcela inicial do *first flush*[1];

c) tratar total ou parcialmente os esgotos combinados.

Em relação ao tratamento total ou parcial vale destacar que o sistema pode incorporar extravasores, ou adicionalmente, implementar reservatórios.

Em relação aos extravasores, que serão explorados com maior detalhe no tópico a seguir, vale destacar que devem ser locados em pontos estratégicos para permitir o alívio do sistema coletor de esgoto em períodos de eventos pluviométricos intensos (Orsini, 2011). Adicionalmente, Madeira (2012) destaca que, para o tratamento do *first flush*, os sistemas devem considerar diâmetros maiores nos interceptores, para poder levar às estações de tratamento as águas pluviais dos momentos iniciais da chuva, que possuem concentrações de poluentes mais elevadas.

No que diz respeito à incorporação de reservatórios para este sistema a lógica desta alternativa complementar é que o excedente do volume do escoamento superficial em dias de chuva seja armazenado temporariamente em uma estrutura de reservação e, posteriormente, seja enviado ao sistema de tratamento. Benetti e Gehling (2004) destacam que a utilização deste sistema de armazenamento viabiliza a retirada parcial de sólidos e material em suspensão no próprio reservatório.

[1] O primeiro fluxo do escoamento superficial gerado por um evento de chuva. Nesta fase, a poluição da água que entra no sistema de drenagem, principalmente em regiões urbanas altamente impermeabilizadas, possui concentrações de poluentes mais elevadas do que o escoamento superficial gerado pelo restante do evento pluviométrico (EPA, 1993).

A Figura 2-3 apresenta o esquema de funcionamento de um sistema unitário com extravasor enquanto a Figura 2-4 apresenta o funcionamento esquemático do sistema com extravasor e com reservatórios de primeira chuva.

Há ainda a possibilidade de tratamento em dois estágios diferentes, um para a contribuição de esgotos domésticos em tempo seco, e outro para o excesso de esgotos combinados, conforme apresentado por Metcalf e Eddy (1991). A Figura 2-5 apresenta o funcionamento do sistema unitário com as estruturas citadas.

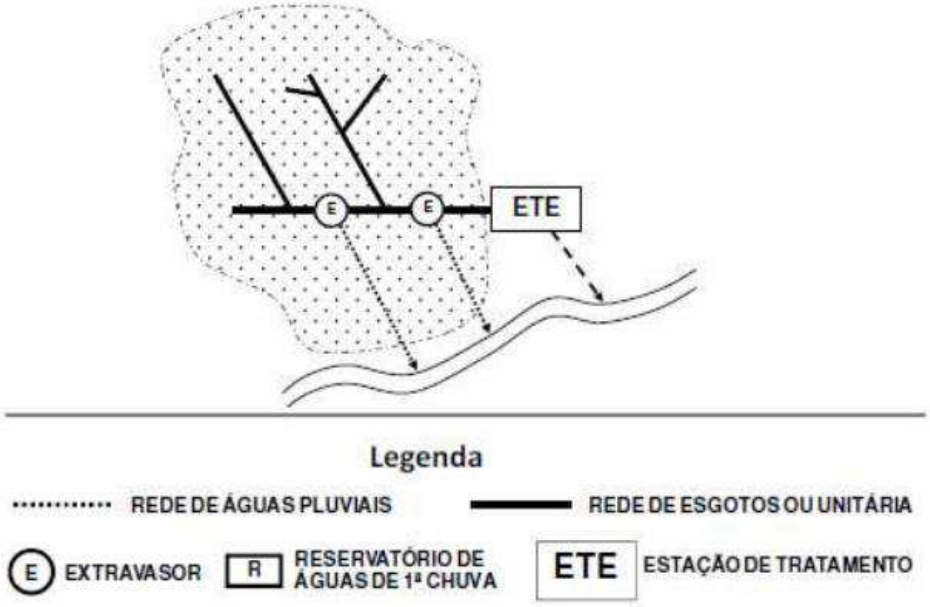

Figura 2-3. Esquema de sistema unitário com implementação de extravasores.
Fonte: Orsini (2011) apud Madeira (2012)

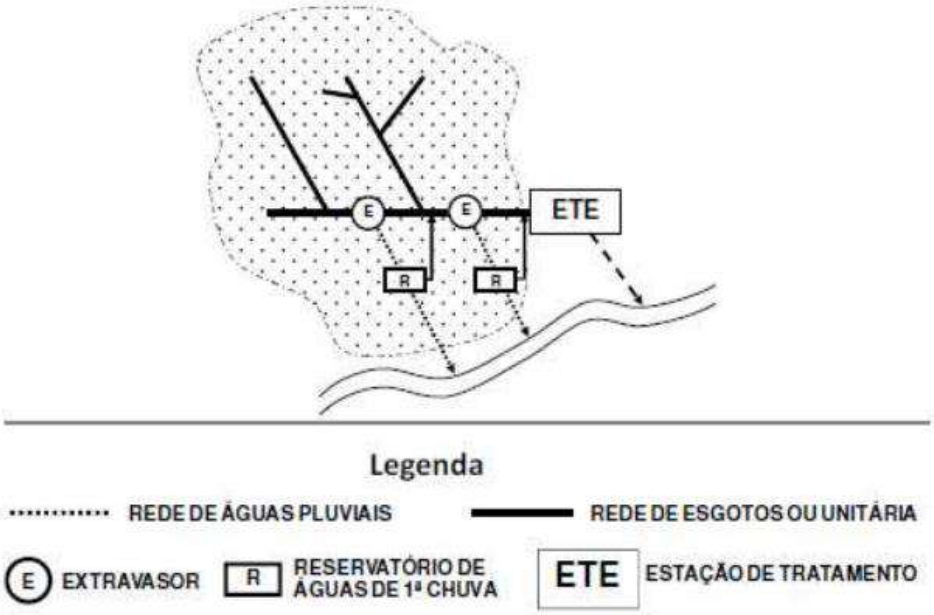

Figura 2-4. Esquema de sistema unitário com implementação de extravasor e de reservatórios. Fonte: Orsini (2011) apud Madeira (2012)

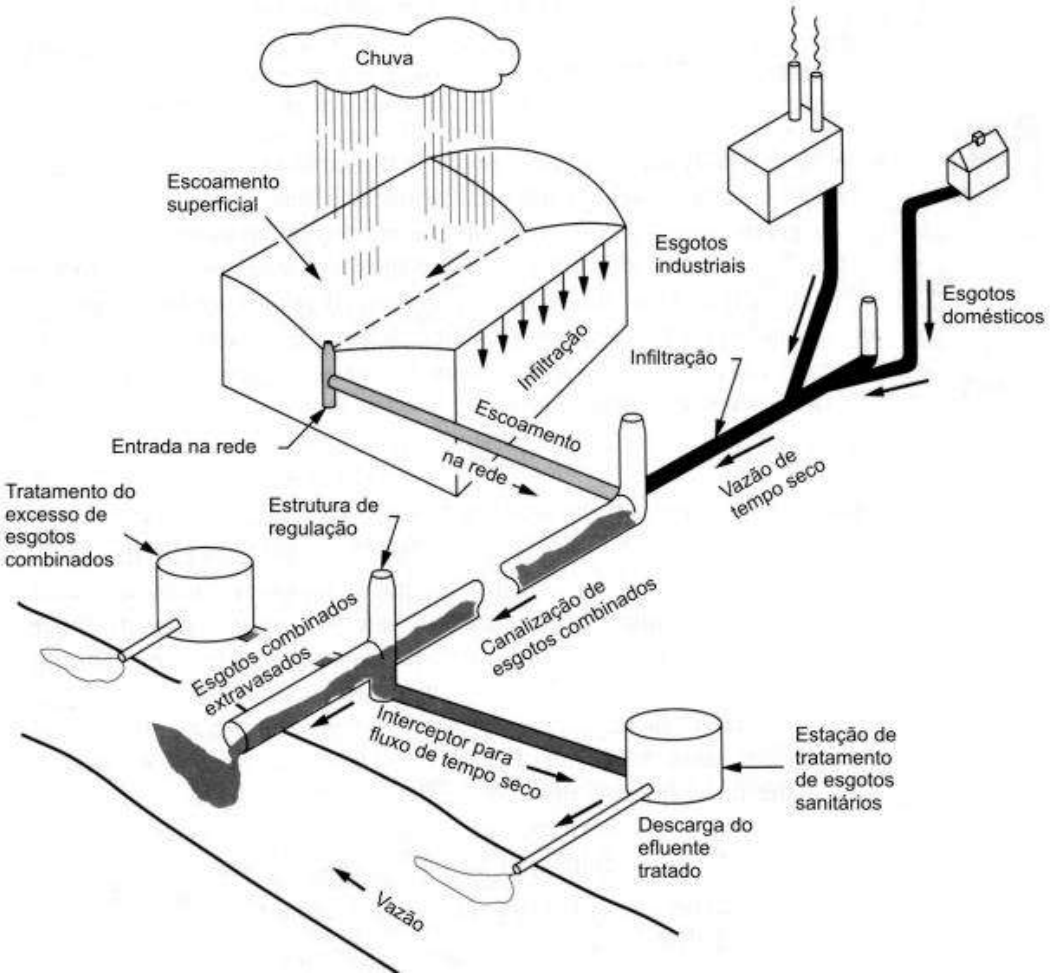

Figura 2-5. Esquema de sistema unitário com tratamento em duas etapas. Fonte: Gehling e Benetti (2005) adaptado de Metcalf e Eddy, (1991)

Em relação às alterações no SES para implementação do sistema unitário, Madeira (2012) realiza um trabalho de identificação das principais adaptações para implementação do sistema. No que diz respeito à alteração das redes destaca que a contribuição de esgoto nas redes de drenagem muito pequena perto da vazão de dimensionamento da contribuição pluvial, não precisando de alteração de diâmetro. Porém, destaca a possibilidade de mau cheiro advindo das bocas-de-lobo e grelhas do sistema de drenagem. Para resolver esta questão, alternativas como a apresentada por Wittler (2012) podem ser utilizadas, nas quais são utilizados os chamados fechos hídricos, nos quais com a implementação de sifões é possível criar uma camada de líquido que permanece na tubulação e não possibilita a passagem de gases, característicos do esgoto sanitário. A Figura 2-6 apresenta um esquema e uma foto da estrutura já implementada.

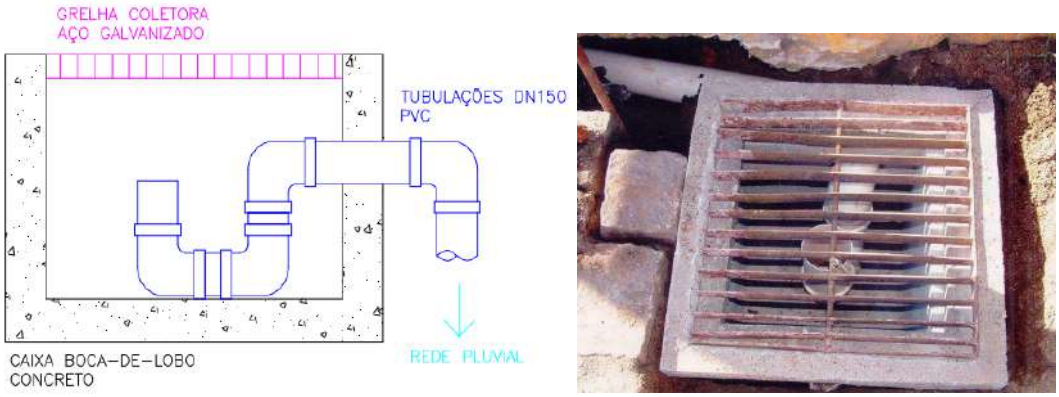

Figura 2-6. Caixa ecológica para esgotos. Fonte: Madeira (2012), adaptado de Wittler (2012)

Em relação aos interceptores de águas combinadas que levam em tempo seco as águas para os sistemas de tratamento, é necessário adequá-los também à contribuição de águas combinadas em períodos de chuvas intensas. Madeira (2012) destaca que o principal objetivo de tais estruturas é evitar a sobrecarga hidráulica e este dispositivo, implementado ao longo dos interceptores, deve ser capaz de regular a vazão de esgoto afluente, evitando o aporte excessivo para os sistemas de tratamento. A Figura 2-7 apresenta o esquema das estruturas e regulação e desvio para proteção do sistema de tratamento.

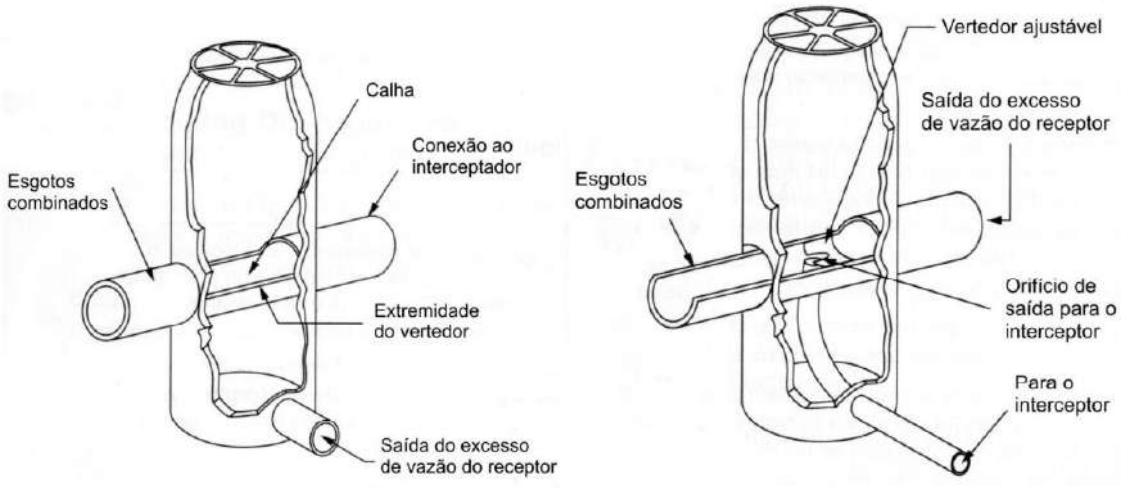

Figura 2-7. Esquema de estruturas e regulação e desvio.
Fonte: Madeira (2012) adaptado de Tchobanoglous e Burton, (1991)

O excesso de águas pluviais em outros trechos críticos da rede de esgotamento sanitário pode ser resolvido com a implementação de extravasores em pontos estratégicos do sistema. Em outras palavras, os extravasores são dispositivos de segurança, utilizados em situações pontuais, que servem para verter o excesso de água durante períodos de chuvas, quando existe um número significativo de ligações parasitas.

Para garantir a segurança e eficiência, os extravasores devem ser dimensionados seguindo as normas 12.207 (ABNT, 1992) e 12.208 (ABNT, 2020) da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Além disso, é necessário o licenciamento ambiental de maneira a prever e controlar os impactos gerados por essas estruturas nos corpos hídricos receptores.

A Figura 2-8 apresenta em vermelho um extravasor padrão localizado em uma estação elevatória, para vertimento do excesso de vazões que aportam para a estrutura.

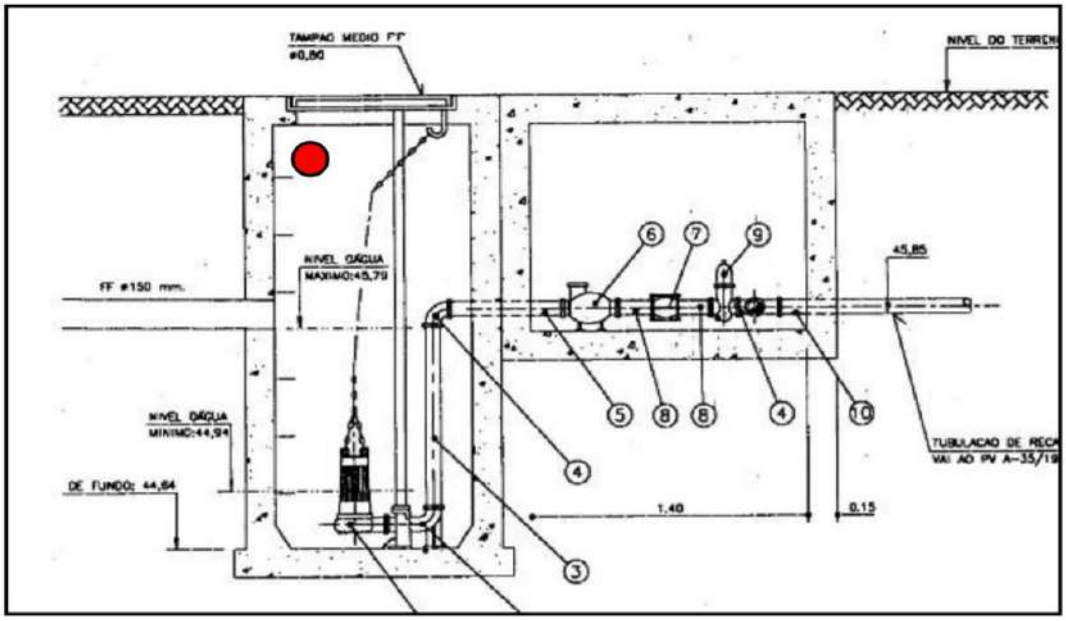

Figura 2-8. Extravasor em estação elevatória de esgoto sanitário. Fonte: Coppetec, 2018.

Em relação aos problemas apresentados pela contribuição das águas residuais clandestinas no sistema de drenagem, em sistemas mistos, destacam-se como alternativa de solução as estruturas de captação de esgotos sanitários em tempo seco (CTS).

Segundo Coppetec (2018) esta captação pode ser do tipo Captação em tempo Seco em Galeria de Águas Pluviais (CTS GAP), como mostra a Figura 2-3, ou CTS em Calha Fluvial (Figura 2-4), sendo a primeira a mais comum e com maior facilidade de implementação.



Figura 2-9. Exemplo de CTS GAP. Fonte: Coppetec, 2018.



Figura 2-10. Exemplo de CTS na Calha Fluvial. Fonte: Coppetec, 2018.

Ainda segundo Coppetec (2018) as estruturas de CTS devem estar o mais próximo às fontes de aporte clandestino de esgotos, de maneira a realizar a sua interceptação e redirecionamento ao sistema de esgotamento convencional. Vale destacar que todas as estruturas de CTS tem como principal funcionalidade:

- Em clima seco, interceptar as águas contaminadas e direcionar para o sistema convencional de esgotamento sanitário por meio do sistema de derivação, evitando a sua contribuição aos corpos hídricos receptores;
- Em período de chuvas, assegurar o extravasamento das vazões resultantes da mescla entre as contribuições de tempo seco e o aporte das águas pluviais aos corpos hídricos receptores, mitigando sua contribuição ao sistema de esgotamento sanitário (o que pode acarretar sobrecarga do sistema).

Em situações em que não é possível implementar CTS há a possibilidade de implementação de interceptores. Estas estruturas são tubulações paralelas aos cursos d'água que tem a função de captar contribuições clandestinas de esgoto que aportam ao corpo receptor (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000; ABNT, 1992). Esta alternativa parte do princípio de que grande parte da rede de drenagem possui aporte de esgotos, e, de maneira a preservar os cursos d'água, é realizada a captação de todas as linhas de drenagem que aportam a ele. Os interceptores também devem estar associados a derivações para o sistema de esgotamento convencional e possuir estruturas de

extravasamento que em período de cheias possibilitem o vertimento do excesso de águas pluvial. A Figura 2-11 apresenta um exemplo de um interceptor.



Figura 2-11. Exemplo de interceptor na calha fluvial. Fonte: Coppetec, 2018.

O interceptor é por vezes também chamado de cinturão sanitário e serve para proteger não somente os rios de aporte das vazões em tempo seco, como também demais corpos d'água como lagoas e estuários. A Câmara Metropolitana (2017), cita que após a implementação de um sistema separador absoluto funcional os interceptores podem cumprir a função de direcionamento das águas de *first-flush* para um sistema de tratamento, evitando a contaminação dos corpos d'água receptores para este primeiro escoamento pluvial.

Finalmente, Madeira (2012) compila alguns pontos de atenção em relação ao sistema de tratamento após a implementação de sistemas unitários dos quais é possível destacar:

Sobrecarga Hidráulica – Esta sobrecarga pode ser tratada pelas estruturas de regulação e desvio apresentadas;

Presença de areia e material sólido – Por mais que alterações devido à combinação de águas urbanas sejam vistas, segundo Bernardes e Soares (2004), são as menos afetadas por alterações e elevações da vazão afluente.

Variação da qualidade do esgoto – Levando em conta a publicação de Bernardes e Soares (2004) é possível considerar que para o sistema unitário haverá uma alteração significativa nos parâmetros DBO, DQO e nitrogênio, esta intensificação de cargas orgânicas estão associadas ao *first flush*, e podem gerar diminuição significativa do Oxigênio Dissolvido, desdobrando em perda de eficiência do tratamento.

Operação do sistema – Para a análise de possíveis alterações de operação dos sistemas de tratamento devem ser levados em conta os limites para incrementos de vazão afluente em sistemas de lodos ativados, o controle durante picos de vazão, a operação do decantador secundário, e o tempo de detenção de lagoas de estabilização (BERNARDES & SOARES, 2004).

2.4 Qualidade das Águas Urbanas – Conceitos e Modelagem

A qualidade da água pode ter variações de suas características desencadeadas por processos naturais ou pela ação antrópica. Em regiões urbanas é evidente que as ações antrópicas têm o papel mais relevante sobre as alterações das principais características da qualidade das águas.

Von Sperling (2014) cita que a interferência do homem sobre os fatores de qualidade da água pode ser realizada de maneira dispersa, como na aplicação de pesticidas no solo, que acabam por contribuir ao ciclo hidrológico, e de maneira concentrada, como visto na contribuição de esgotos domésticos e industriais nos corpos d'água e sistemas de drenagem.

Essas contribuições naturais ou antrópicas têm o potencial de alterar o grau de pureza da água, modificando as caraterísticas: físicas; químicas; e biológicas. A Figura 2-12 apresenta de maneira resumida as principais impurezas presentes na água que afetam sua qualidade (Barnes *et al*., 1981).

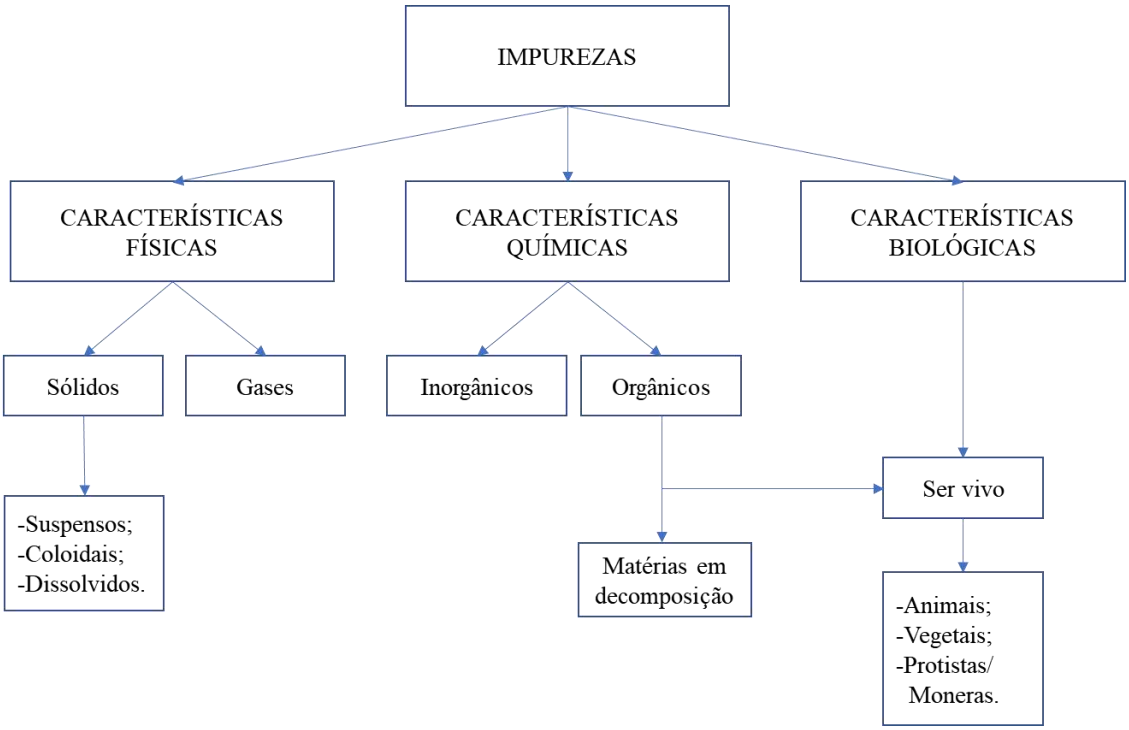

Figura 2-12. Impurezas que afetam a qualidade das águas.
Fonte: Adaptado de Barnes *et al.* (1981).

Vale destacar que em muitos casos as características físicas e químicas são agrupadas de maneira a obter os parâmetros físico-químicos.

Os principais parâmetros físico-químicos são: oxigênio dissolvido; matéria orgânica; nitrogênio; fósforo; temperatura; pH; micropoluentes inorgânicos; e micropoluentes orgânicos. Em relação aos parâmetros biológicos, destacam-se: bactérias; algas; fungos; protozoários; vírus; e helmintos (Von Sperling, 2014). A maioria dos microrganismos presentes no esgoto vêm do organismo dos seres humanos (NASCIMENTO & ARAÚJO, 2013).

Diante dos diversos parâmetros que caracterizam a qualidade das águas urbanas, destacam-se os parâmetros físico-químicos de oxigênio dissolvido e de matéria orgânica.

A matéria orgânica, proveniente principalmente dos esgotos, é a principal fonte de poluição das águas da cidade. Matéria orgânica e oxigênio dissolvido são essenciais para processos desenvolvidos pelos microrganismos presentes nas águas urbanas contaminadas. No processo metabólico de estabilização da matéria orgânica pelas bactérias, estas utilizam o oxigênio no processo de respiração (Von Sperling, 2014), conforme pode ser apresentado na Equação 2-4 de oxidação da matéria orgânica e consumo de oxigênio.

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + Energia$$ Equação 2-4

A matéria orgânica em quantidades elevadas ocasiona variações de cor, odor e turbidez, além do consumo do oxigênio dissolvido já mencionado. O consumo do oxigênio dissolvido na água, por sua vez, pode ocasionar desequilíbrios ecológicos e a extinção de organismos aeróbios da água.

Von Sperling (2014) destaca a dificuldade de determinação direta da matéria orgânica na água, sendo necessária, assim uma medição indireta para quantificar este parâmetro. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) são os parâmetros mais utilizados no cenário atual, com destaque para o DBO diante da sua maior facilidade de determinação.

Por mais que possam ocorrer, em condutos fechados de drenagem ou esgotamento sanitário, processos de decomposição não aeróbios da matéria orgânica, a maneira comum de decomposição, gerada pelo aporte de contaminantes e pelo fluxo em superfície livre, é o processo aeróbio.

Ambos os parâmetros determinam o consumo necessário de oxigênio dissolvido para realizar o processo de estabilização da matéria orgânica total contida na água, conforme a Equação 2-4, apresentada anteriormente. A DBO representa a matéria orgânica mineralizada por atividades dos microrganismos e a DQO inclui, adicionalmente, a matéria orgânica estabilizada por processos químicos.

A Tabela 2-3 apresenta as principais características dos parâmetros de oxigênio dissolvido e matéria orgânica.

Tabela 2-3. Características principais dos parâmetros de oxigênio dissolvido e matéria orgânica. Fonte: Von Sperling (2014).

Características	***Oxigênio dissolvido***	***Matéria orgânica***
Forma do constituinte responsável	Gás dissolvido	Sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos
Origem natural	Dissolução do oxigênio atmosférico; produção pelos organismos fotossintéticos	Matéria orgânica vegetal e animal; microrganismos
Origem antropogênica	Introdução de aeração artificial; produção pelos organismos fotossintéticos em corpos d'água eutrofizados	Despejos domésticos e industriais
Importância	Vital para seres aquáticos aeróbios; principal parâmetro de caracterização dos efeitos da poluição das águas por despejos orgânicos	A matéria orgânica é responsável pelo consumo, pelos microrganismos decompositores, do oxigênio dissolvido na água; A DBO e a DQO tratam, de forma indireta, o teor de matéria orgânica nos esgotos ou no corpo d'água, sendo, portanto, uma indicação do consumo de oxigênio dissolvido; e a DBO e a DQO são parâmetros de maior importância na caracterização do grau de poluição de corpos d'água
Utilização mais frequente do parâmetro	Controle operacional de estações de tratamento de esgotos; caracterização de corpos d'água	Caracterização de águas residuárias brutas e tratadas e caracterização dos corpos d'água
Unidade	mg/L	mg/L

Porém, as alterações dos parâmetros apresentados não são uniformes nos escoamentos. Para um determinado curso d'água é possível prever zonas de qualidade da água após a contribuição irregular de um determinado contaminante. Von Sperling (2005, 2014) cita que há quatro principais zonas de autodepuração que correspondem às zonas de degradação, de decomposição ativa, de recuperação e de águas limpas.

Tabela 2-4. Características e descrições da zona de degradação. Fonte: Von Sperling (2014).

Características	***Descrição***
Característica geral	Esta zona tem início logo após o lançamento das águas residuárias no curso d'água. A principal característica química é a alta concentração de matéria orgânica, ainda em seu estado complexo, mas potencialmente decomponível.
Aspecto estético	No ponto de lançamento a água se apresenta turva, devido aos sólidos presentes nos esgotos. A sedimentação de sólidos resulta na formação de bancos de Iodo.
Matéria orgânica e oxigênio dissolvido	Como o nome bem caracteriza, nesta zona há uma completa desordem, em relação à comunidade estável antes existente. O processo de decomposição da matéria orgânica, efetuado pelos microrganismos decompositores, pode ter um início lento, dependendo da adaptação dos seres decompositores aos despejos. Normalmente, no caso de despejos predominantemente orgânicos, os microrganismos presentes nas águas residuárias são os responsáveis pelo início da decomposição. Como esta pode ser ainda incipiente, o consumo de oxigênio dissolvido para as atividades respiratórias dos microrganismos pode ser também reduzido, possibilitando a que seja encontrado oxigênio dissolvido suficiente para a vida de peixes. Após a adaptação dos microrganismos, a taxa de consumo da matéria orgânica atinge o seu máximo, implicando também na taxa máxima de consumo de oxigênio dissolvido.
Microrganismos decompositores	Após o período de adaptação, inicia-se a proliferação bacteriana, com uma predominância maciça das formas **aeróbicas**, ou seja, que dependem do oxigênio disponível no meio para os seus processos metabólicos. As bactérias decompositoras, possuindo alimento em abundância, na forma da matéria orgânica introduzida pelos despejos, e com suficiente oxigênio para a sua respiração, têm amplas condições para o desenvolvimento e reprodução. O teor de matéria orgânica apresenta o seu máximo no ponto de lançamento e, devido à decomposição pelos microrganismos, principia a decrescer.
Subprodutos de decomposição	Há um aumento nos teores de gás carbônico, um dos subprodutos do processo respiratório microbiano. Com o aumento das concentrações de CO_2, convertido a ácido carbônico na água, pode haver uma queda no pH da água, tornando-a mais ácida.
Lodo de fundo	No lodo de fundo, devido à dificuldade de intercâmbio gasoso com a atmosfera, passam a prevalecer condições **anaeróbias**, isto é, de ausência de oxigênio dissolvido. Como consequência de tal, há a produção de gás sulfídrico, potencial gerador de odores desagradáveis.
Nitrogênio	Os compostos nitrogenados complexos apresentam-se ainda em altos teores, embora já ocorra a conversão de grande parte dos mesmo a amônia.
Comunidade aquática	Há uma sensível diminuição do número de espécies de seres vivos, embora o número de indivíduos em cada uma seja bem elevado, caracterizando um ecossistema perturbado. Há o desaparecimento das formas menos adaptadas e a predominância e desenvolvimento das formas resistentes e melhor aparelhadas às novas condições. A quantidade de bactérias do grupo coliforme, oriundas do trato intestinal humano, é bastante elevada, quando a poluição tem como fonte contaminações de origem humana, como esgotos domésticos. Ocorrem também protozoários que se alimentam de bactérias além de fungos que se alimentam da matéria orgânica. A presença de algas é rara, devido à dificuldade de penetração da luz, em razão da turbidez da água, fruto dos sólidos em suspensão introduzidos pelos esgotos. Ocorre uma evasão de hidras, esponjas, musgos, crustáceos, moluscos e peixes.

Tabela 2-5. Características e descrições da zona de decomposição ativa.
Fonte: Von Sperling (2014).

Características	***Descrição***
Característica geral	Após a fase inicial de perturbação do ecossistema, este principia a se organizar, com os microrganismos desempenhando ativamente suas funções de decomposição da matéria orgânica. Como consequência, os reflexos no corpo d'água atingem os seus níveis mais acentuados, e a qualidade da água apresenta-se em seu estado mais deteriorado.
Aspecto estético	Observa-se ainda acentuada coloração na água e os depósitos de Iodo escuro no fundo.
Matéria orgânica e oxigênio dissolvido	Nesta zona o oxigênio dissolvido atinge a sua menor concentração. Caso a quantidade de esgoto lançada tenha sido de uma certa magnitude, pode ser que o oxigênio dissolvido venha a ser totalmente consumido pelos microrganismos. Nesta situação, têm-se condições de anaerobiose em toda a massa líquida, no trecho em questão. Desaparece, consequentemente, a vida aeróbica, dando lugar à predominância de organismos anaeróbicos.
Microrganismos decompositores	As bactérias decompositoras principiam a se reduzir em número, devido principalmente à redução na disponibilidade de alimento, em grande parte já estabilizado. Outros fatores interagem ainda na sua redução, como luz, floculação, adsorção, precipitação.
Subprodutos de decomposição	Caso haja reações anaeróbicas, os subprodutos são, além do gás carbônico e da água, o metano, gás sulfídrico, mercaptanas e outros, vários deles responsáveis pela geração de maus odores.
Nitrogênio	O nitrogênio apresenta ainda a forma orgânica, embora a maior parte já se encontre na forma de amônia. No final da zona, já com a presença de oxigênio dissolvido, pode principiar a oxidação da amônia a nitrito.
Comunidade aquática	O número de bactérias entéricas, quer patogênicas ou não, diminui. Isto se deve a que tais bactérias, adaptadas às condições ambientais prevalecentes no trato intestinal humano, não resistem às novas condições ambientais, predominantemente adversas à sua sobrevivência. O número de protozoários se eleva, o que implica na ascensão em um degrau na pirâmide alimentar, dentro do processo de sucessão ecológica. Ocorre a presença de alguns microrganismos e larvas de insetos, dotados de meios para sobreviver nas condições predominantes. No entanto, a macrofauna é ainda restrita em espécies. Não voltaram a surgir ainda as hidras, esponjas, musgos, crustáceos, moluscos e peixes.

Tabela 2-6. Características e descrições da zona de recuperação. Fonte: Von Sperling (2014).

Características	***Descrição***
Característica geral	Após a fase de intenso consumo de matéria orgânica e de degradação do ambiente aquático, inicia-se a etapa de recuperação.
Aspecto estético	A água está mais clara e a sai aparência geral apresenta-se grandemente melhorada. Os depósitos de Iodo sedimentados no fundo apresentam uma textura mais granulada e não tão fina, não havendo mais desprendimento de gases ou de mau cheiro.
Matéria orgânica e oxigênio dissolvido	A matéria orgânica, intensamente consumida nas zonas anteriores, já se encontra grandemente estabilizada, ou seja, transformada em compostos inertes. Isto implica em que o consumo de oxigênio, através da respiração bacteriana, seja mais reduzido. Com isso, paralelamente à introdução de oxigênio atmosférico na massa líquida, aumentam os teores de oxigênio dissolvido (a produção de oxigênio pela reaeração atmosférica passa a ser maior que o consumo de oxigênio para a estabilização da matéria orgânica). As condições anaeróbicas possivelmente preponderantes na zona anterior não mais ocorrem. Isto traz como consequência uma nova mudança na fauna e na flora aquáticas.
Nitrogênio	A amônia é convertida a nitritos e estes a nitratos. Além destes, os compostos de fósforo são transformados a fosfatos. Ocorre, portanto, uma fertilização do meio, pela produção dos sais minerais (nitratos e fosfatos), os quais são nutrientes para algas.
Algas	Devido à presença de nutrientes, e à maior transparência da água (proporcionando uma maior penetração da luz), há condições para o desenvolvimento de algas. Com sua presença, há a produção de oxigênio pela fotossíntese, elevando ainda mais os teores de oxigênio dissolvido no meio. Ainda em decorrência da presença de algas, ocorre uma maior diversificação da cadeia alimentar, em razão do desenvolvimento de microrganismos heterotróficos que delas se alimentam.
Comunidade aquática	O número de bactérias encontra-se bem mais reduzido e, como consequência, também o de protozoários bacteriófagos. As algas apresentam-se em franca reprodução. As primeiras a aparecer são as algas azuis, na superfície e nas margens, depois os flagelados e algas verdes e, finalmente, as diatomáceas. Os microcrustáceos ocorrem em seu máximo, apresentando-se ainda em grande número os moluscos e vários vermes, dinoflagelados, esponjas, musgos e larvas de insetos. A cadeia alimentar está mais diversificada, gerando a alimentação dos primeiros peixes, mais tolerantes.

Tabela 2-7. Características e descrições da zona de águas limpas. Fonte: Von Sperling (2014).

Características	***Descrição***
Característica geral	As águas apresentam-se novamente limpas, voltando a ser atingidas as condições normais anteriores à poluição, pelo menos no que diz respeito ao oxigênio dissolvido, à matéria orgânica e aos teores de bactérias e, provavelmente, de organismos patogênicos.
Aspecto estético	A aparência da água encontra-se similar à anterior à ocorrência da poluição.
Matéria orgânica e oxigênio dissolvido	Na massa líquida há a predominância das formas completamente oxidadas e estáveis dos compostos minerais, embora o lodo de fundo não esteja necessariamente estabilizado. A concentração de oxigênio é próxima à de saturação, devido ao baixo consumo pela população microbiana e à possivelmente elevada produção pelas algas.
Comunidade aquática	Devido à mineralização ocorrida na zona anterior, as águas são agora mais ricas em nutrientes do que antes da poluição. Assim, a produção de algas é bem maior. Há o restabelecimento da cadeia alimentar normal. São encontradas ninfas de odonatas, efemérides, assim como grandes crustáceos de água doce, moluscos e vários peixes. A diversidade da espécie é grande. O ecossistema encontra-se estável e a comunidade atinge novamente o clímax.

Determinar a qualidade das águas urbanas é um grande desafio visto a complexidade dos fenômenos envolvidos. Modelos matemáticos vem sendo amplamente utilizados em âmbito internacional para alcançar o desafio. Porém, há diferenças evidentes da maneira como os diversos países tratam esta questão. Von Sperling (2014) destaca que enquanto países desenvolvidos estão preocupados em determinar e corrigir os períodos específicos nos quais as concentrações de poluentes estão fora dos padrões preconizados por norma, nos países em desenvolvimento, como o Brasil, visto o elevado grau de degradação dos corpos hídricos, o objetivo principal da utilização de modelagem da qualidade é auxiliar no enquadramento dentro de um padrão, ainda distante da realidade local das grandes cidades. Visto isso, qualquer esforço de melhoria da qualidade dos parâmetros dos corpos d'água urbanos é válido, apesar de não estarmos próximos dos padrões ambientais adequados em grande parte dos casos.

O processo de modelagem da qualidade da água parte da interpretação que as alterações na concentração dos constituintes no tempo são dadas por processos físicos de convecção, difusão e conversão (ROSMAN *et al*., 2001). Segundo Von Sperling (2014) os eixos de ocorrência das mudanças no espaço e no tempo dos constituintes da água seguem os conceitos apresentados na Figura 2-13.

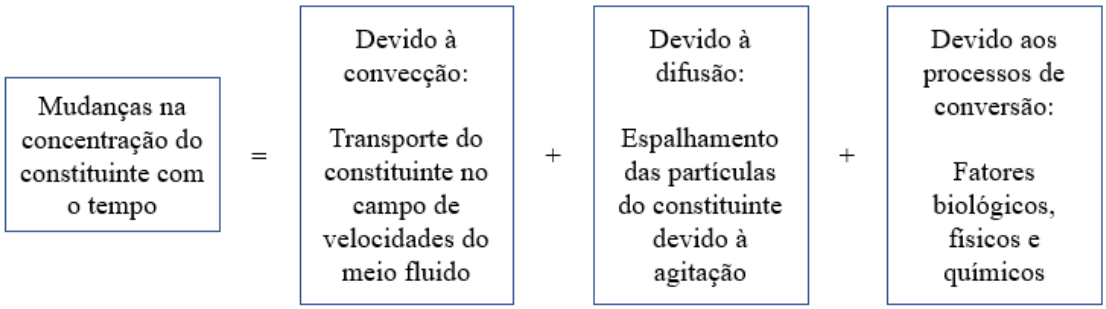

Figura 2-13. Esquema dos principais fatores envolvidos nas mudanças dos constituintes. Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014)

Cursos d'água tem a capacidade de gerar as mudanças de concentração (reações) observadas anteriormente. Dessa maneira, e como premissa para a modelagem da qualidade da água em rios, os cursos d'água podem ser considerados como reatores biológicos. Esta consideração apresentada por Levenspiel (2000) permite a consideração de uma série de equações para resolver os problemas de qualidade, com foco em cursos d'água.

Os tipos de reação que os reatores biológicos podem ocasionar aos constituintes obedecem a Equação 2-5 que relaciona a taxa de reação, a constante de reação, a concentração do reagente e a ordem da reação (Levenspiel, 2000).

$$r = KC^n \qquad \text{Equação 2-5}$$

Na qual:
r = taxa de reação ($ML^{-3}T^{-1}$)
K = constante de reação (T^{-1})
C = concentração do reagente (ML^{-3})
n = ordem da reação

Quanto ao valor da ordem: a reação de ordem zero (n=0), r não depende da concentração do reagente; a reação de primeira ordem (n=1), r é diretamente proporcional à concentração do reagente; e para reação de segunda ordem (n=2) r é proporcional ao quadrado da concentração do reagente.

A Equação 2-5 pode ser aplicada na equação de balanço de massa em um reator, na qual é levado em consideração as matérias que entram, as que saem, e as que são geradas, consumidas e/ou são acumuladas no volume de controle em questão. Von Sperling (2014)

destaca que a forma mais usual de representação da equação do balanço de massa, considerando um volume fixo, pode ser dada conforme apresentado na Equação 2-6.

$$V\frac{dC}{dt} = QC_0 - QC + r_pV - r_cV \qquad \text{Equação 2-6}$$

Na qual:
V= volume do reator (desde que seja considerado mistura completa conforme será visto a seguir) (L^{-3})
C = concentração do composto em um tempo t (ML^{-3})
C_0 = concentração afluente do composto (ML^{-3})
Q = vazão ($L^{-3}T^{-1}$)
r_p = taxa da reação de produção do composto ($ML^{-3}T^{-1}$)
r_c = taxa da reação de consumo do composto ($ML^{-3}T^{-1}$)

Para a consideração de rios como reatores biológicos, Von Sperling (2014) cita dois modelos hidráulicos básicos idealizados: fluxo em pistão e mistura completa. O modelo de fluxo em pistão corresponde a dispersão nula, no qual o escoamento ocorre como um êmbolo, sem apresentar misturas longitudinais. Para o modelo de mistura completa a dispersão é infinita, ou seja, as partículas dentro do reator são imediatamente dispersas, apresentando características contínuas e uniformemente distribuídas.

Há ainda dois modelos que podem ser incorporados na representação de rios: modelo de reatores de mistura completa em série; e o modelo de fluxo disperso. A Tabela 2-8 apresenta as características principais dos modelos hidráulicos para representação de rios como reatores biológicos.

Tabela 2-8. Características das representações hidráulicas comumente utilizadas para reatores. Fonte: Von Sperling (2014)

Modelo hidráulico	**Maior utilização na modelagem**	**Características**
Fluxo em pistão	Rios	As partículas de fluido entram continuamente em uma extremidade do tanque, passam através do mesmo e são descarregadas na outra extremidade, na mesma sequência em que entraram. O fluxo de processa como um êmbolo, sem misturas longitudinais. As partículas mantêm a sua identidade e permanecem no reator por um período igual ao tempo de detenção hidráulica. Este tipo de fluxo é comumente usado para representar rios, que possuem uma elevada relação comprimento-largura, na qual a dispersão longitudinal é mínima. Os reatores de fluxo em pistão são reatores idealizados, já que a ausência completa de dispersão é difícil de obter na prática.
Mistura completa	Lagos e represas	As partículas que entram no reator são imediatamente dispersas em todo o corpo do reator. O fluxo de entrada e saída é contínuo. As partículas deixam o reator em proporção à sua distribuição estatística. A mistura completa pode ser obtida em reatores se o conteúdo do tanque for contínua e uniformemente distribuído. Os reatores de mistura completa não são adequados para representar rios, mas são muitas vezes utilizados na representação hidráulica de lagos e represas. Os reatores de mistura completa são reatores idealizados, já que a dispersão total e instantânea é difícil de obter na prática.
Reatores de mistura completa em série	Rios	Os reatores de mistura completa sem série são usados para modelar o regime hidráulico que existe entre os regimes ideais de fluxo em pistão e mistura completa. Se a série for composta de uma unidade apenas, o sistema reproduz um reator de mistura completa. Se o sistema apresentar um número infinito de reatores em série, o fluxo em pistão é reproduzido. O fluxo de entrada e saída é contínuo. A representação hidráulica de reatores de mistura completa em série é frequentemente utilizada para rios.
Fluxo disperso	Rios e lagos/represas	O fluxo disperso ou arbitrário é obtido em um sistema qualquer com um grau de mistura intermediário entre os dois extremos idealizados de fluxo em pistão e mistura completa. Na realidade, a maior parte dos reatores apresenta fluxo disperso. No entanto, devido à maior dificuldade na sua modelagem, são feitas aproximações para um dos modelos hidráulicos ideais (no caso de rios, para o modelo de fluxo em pistão, ou para reatores em série). O fluxo de entrada e saída é contínuo.

Em relação à da autodepuração de cursos d'água pode ser destacado o modelo de Streeter-Phelps (STREETER, 1925) para determinação de DBO e OD. O modelo pode ser considerado unidirecional e de regime permanente, considerando ainda a velocidade constante no curso d'água. Para este modelo os principais mecanismos considerados de consumo e produção de oxigênio são considerados os processos de reaeração atmosférica e a desoxigenação. Em relação a progressão de DBO remanescente, o modelo de Streeter-Phelps pode ser escrito a partir de solução analítica conforme apresentado na Equação 2-7.

$$L = L_0 e^{-\frac{k_1}{u}x} \qquad \text{Equação 2-7}$$

Na qual: *L* representa a concentração de DBO remanescente (mg/L); L_0 é a concentração no ponto inicial de DBO, ou no ponto de lançamento do efluente, (mg/L); k_1 é o coeficiente de desoxigenação (dia^{-1}); e x é a distância no eixo do curso d'água.

Uma consideração importante do modelo é apresentada na Equação 2-8 que relaciona a concentração de oxigênio dissolvido, a concentração de saturação e o déficit de oxigênio.

$$C_{O_2} = C_S - D \qquad \text{Equação 2-8}$$

Na qual: C_{O_2} é a concentração de oxigênio dissolvido; e C_S é a concentração de saturação; e *D* representa o déficit de oxigênio.

Adicionalmente, o déficit de oxigênio por sua vez pode ser escrito pela Equação 2-9.

$$D = D_0 e^{-\frac{k_2}{u}x} + \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1}\left[e^{-\frac{k_1}{u}x} - e^{-\frac{k_2}{u}x}\right] \qquad \text{Equação 2-9}$$

Na qual: D_0 é o déficit de oxigênio no ponto inicial, ou no ponto de lançamento do efluente; u é a velocidade de escoamento do curso d'água; e k_2 representa coeficiente de reaeração (dia^{-1}).

Porém, como destacado por Von Sperling (2014) a representação dos fenômenos de qualidade da água pelo modelo de Streeter-Phelps, apesar de ser útil para representar de maneira geral os fenômenos, representa uma simplificação do balanço do oxigênio dissolvido. Assim, a incorporação de outros fenômenos se torna fundamental para a representação completa do fenômeno e obtenção de resultados mais próximos dos observados na prática.

Von Sperling (2014) cita que para a modelagem avançada do oxigênio dissolvido, outros fenômenos devem ser levados em conta como a modelagem do OD em situações de anaerobiose, a sedimentação da matéria orgânica, o consumo de OD pelo processo de nitrificação, e a consideração de cargas difusas sem vazão que correspondem especificamente à demanda de oxigênio do sedimento, o processo de fotossíntese e de respiração, além de possíveis cargas externas.

2.5 Estado da Arte do Estudo Integrado das Redes Urbanas de Drenagem Pluvial e Esgotamento Sanitário

Nos últimos 40 anos o tratamento integrado das águas urbanas vem sendo foco de diversas publicações internacionais. Como destacado por Radesca (2018) a Europa e os EUA representam a vanguarda no planejamento integrado e aperfeiçoamento dos sistemas de águas pluviais e de águas residuais, uma vez que existem normas vigentes para a utilização do sistema unitário. Nestes países, diversas ferramentas de simulação vêm sendo desenvolvidas nesta temática. Destacam-se as seguintes publicações internacionais que abordam o estudo integrado das redes de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário:

Environmental Protection Agency - EPA (1983): O documento "*Results of the Nationwide Urban Runoff Program*" (Resultados do Programa Nacional de Escoamento Urbano) apresenta uma das primeiras diretrizes para resolver questões básicas do manejo das águas urbanas de maneira integrada e fornece informações práticas necessárias para o seu planejamento.

Gupta e Saul (1996): O trabalho desenvolvido na Inglaterra prevê a melhoria do dimensionamento dos reservatórios de armazenamento dos sistemas unitários de diversas bacias para tratamento dos Sólidos em Suspensão (SS) em fenômenos de *first-flush*. O trabalho propõe a utilização de equações mais simples em substituição aos modelos mais sofisticados utilizados na época (QSIM e Mousetrap) para prever os poluentes em fluxos de esgoto urbano. O principal argumento para esta proposição é que os requisitos de dados para esses modelos são extensos, e isto normalmente limita sua aplicação.

QSIM é um modelo determinístico de qualidade de água, o que significa que os processos relevantes para os contaminantes de um rio são descritos funcionalmente por métodos diferenciais e algébricos (Kirchesch e Schöl, 1999).

O Mousetrap (CRABTREE, R. *et al.*, 1994) foi desenvolvido para prever variações de curto prazo na qualidade do fluxo de esgoto e transporte de sedimentos em resposta a eventos de tempestade. Mousetrap é um modelo determinístico composto por uma série de módulos para representar: a qualidade do escoamento superficial; transporte de sedimentos e poluentes, erosão e deposição em tubulações; e os processos biológicos e químicos dentro do sistema de esgoto.

Sztruhár *et al.*, (2002): Realiza a simulação de mais de 300 transbordamentos dos sistemas de águas urbanas (*Combined sewer overflows - CSOs*) na Eslováquia. Um dos objetivos do trabalho foi fornecer Concentrações Médias de Eventos (*Event Mean Concentrations - EMC*) para cálculos anuais de carga de poluição de águas residuais para outros países com soluções similares ao sistema unitário de drenagem urbana adotado na Eslováquia.

Todeschini, Papiri e Ciaponi (2012): Foram avaliados os desempenhos de tanques de retenção de águas pluviais, em um sistema unitário, com configurações alternativas de projeto e condições de operação de acordo com uma abordagem integrada. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o modelo SWMM (*Storm Water Management Model*).

O SWMM contém recursos de modelagem hidráulica usados para simular escoamento e entradas externas através da rede do sistema de drenagem de tubos, canais, unidades de armazenamento/tratamento e estruturas de desvio. Também possui a capacidade de realizar processos hidrológicos de transformação de chuva em vazão, além de poder estimar a produção de cargas poluentes associadas ao escoamento de águas pluviais.

Montserrat *et al.* (2014): O objetivo deste estudo espanhol foi desenvolver uma metodologia para avaliar o desempenho de um sistema unitário utilizando monitoramento de baixo custo. O trabalho conclui que uma melhor coleta e análise de dados em tempo real diminuiria a necessidade de modelos preditivos e poderiam reduzir ainda mais os custos de manutenção ocasionados pelos CSOs.

Riechel *et al.* (2016): O trabalho mostra avanços significativos em relação à simulação de sistemas unitários, tanto do viés da drenagem urbana sob eventos de cheia, como também em relação à simulação da qualidade da água. O sistema de drenagem sob eventos extremos é simulado por meio do modelo InfoWorks CS (WSL, 2004). Em relação à simulação da qualidade do curso d'água foi utilizado o modelo unidimensional Hydrax/QSim. O modelo Hydrax simula a hidráulica do rio em situação de estiagem resolvendo todas as equações de Saint-Venant (Oppermann *et al*., 2015). A representação do modelo unidimensional foi escolhida, uma vez que nenhum perfil horizontal ou vertical de qualidade da água foi observado durante as investigações preliminares. A qualidade da água foi calculada pelo modelo QSim (Kirchesch e Schöl, 1999) que recebe

dados hidráulicos de entrada do modelo Hydrax. O acoplamento dos modelos de esgoto e do modelo fluvial é realizado por meio da exportação e importação de arquivos de texto para simulação de vazão e qualidade da água em cada CSO.

O modelo InfoWorks é uma ferramenta computacional desenvolvida para simular o desempenho hidráulico do sistema de rede. Com a adição de bueiros, tubos, pontes, comportas, açudes e bombas, permite simular com boa precisão modelos hidrodinâmicos 1D e simulações 2D em ambientes urbanos e planícies de inundação de rios. No entanto, é necessária uma calibração extensiva para usar o modelo para projeto ou para simular o desempenho hidráulico de uma obra de tratamento em vários cenários (Kumar *et al*., 2013).

Joshi, *et al*. (2020): O trabalho realizado na comuna de Fehraltorf, na Suíça investigou o potencial e a relação custo-benefício de sistemas de drenagem sustentável – SUDS (*Sustainable Drainage Systems*) na redução de OSC. As simulações foram realizadas por meio do modelo SWMM e foram testadas alternativas de jardins de chuva, pavimento permeável, reservatório de lote e telhado verde na escala de uma pequena bacia de sistema de esgotamento. Os resultados mostram uma mitigação nos extravasamentos do sistema, especialmente para os jardins de chuva. Outras tecnologias SUDS apresentam redução limitada de CSO durante os mesmos eventos pluviométricos de alta intensidade.

Jean *et al*. (2021): O trabalho apresenta uma metodologia inovadora para simulação e otimização em um estudo de caso da Província de Quebec, Canadá. O objetivo da metodologia é otimizar a distribuição espacial da infraestrutura verde (Green Infraestructure - GI), a capacidade e localização de infraestrutura cinza e os parâmetros específicos para regras de operação de controle em tempo real de um sistema de águas urbanas para reduzir a frequência e o volume dos CSOs. O caso de estudo foi simulado com o modelo PCSWMM (CHI, 2020). Os resultados encontrados sugerem que a melhor alternativa para o controle das falhas do sistema é a integração das infraestruturas verdes e cinzas com a operação de controle em tempo real.

O PCSWMM é capaz de simular um conjunto hidráulico diverso, utilizando para escoamento via águas subterrâneas, ou contribuições externas por meio de rede de sistema de drenagem de canais naturais, tubulações, estruturas de armazenamento/tratamento e malhas terrestres em duas dimensões. Além disso, podem ser inseridos no modelo

singularidades hidráulicas como bueiros, divisores de fluxo, bombas, açudes e orifícios. Adicionalmente, o PCSWMM também é capaz de estimar a produção de cargas poluentes associados a este escoamento.

Em relação à experiência brasileira no tratamento integrado dos sistemas podemos destacar:

Dias (2003): O trabalho realiza uma análise minuciosa das interconexões entre os sistemas de drenagem e de esgotamento no município do Rio de Janeiro. Apesar de não realizar modelagem, o trabalho apresenta informações relevantes a respeito do histórico de interação entre os setores e seu potencial degradador do ambiente;

Yazaki, Haupt e Porto (2007): O trabalho avalia o uso de reservatórios de *first-flush* na bacia hidrográfica do Rio Tietê. Pelos cálculos realizados no âmbito do trabalho, foi possível determinar uma redução na faixa de 40 a 80 porcento em massa de DBO.

Bahia (2010): O Plano Estadual de Manejo de Águas Pluviais e Esgotamento Sanitário (PEMAPES) da Bahia é um dos precursores na proposição de alternativas integradas do sistema de esgotamento sanitário e o sistema de drenagem urbana. O Plano, baseado na necessidade de tratar e mitigar a degradação dos corpos receptores, propõe o aproveitamento do sistema misto existente com a implementação de dispositivos de tempo seco. Propõe que este será o estado inicial do sistema e que deverá ser buscada a melhoria gradual dos serviços.

Fadel e Dornelles (2015): O trabalho realiza, a partir de um modelo simplificado de chuva-vazão (SCS), a estimativa o total de massa de DBO efluente ao corpo hídrico receptor do Córrego Capivara no Rio Grande do Sul. Esta estimativa é realizada para dois cenários: cenário com e sem captação em tempo seco. Os resultados apresentados pelo trabalho concluem que a implementação de estruturas de tempo seco pode reduzir, de maneira efetiva, a poluição do corpo hídrico receptor.

Radesca (2018): O trabalho utiliza o estudo de caso do Rio Dona Eugênia no estado do Rio de Janeiro, para realizar a simulação de três cenários: cenário sem microdrenagem; cenário com sistema separador absoluto de drenagem; e cenário com sistema misto. A simulação é realizada mediante a aplicação do Modelo de Células de Escoamento (Miguez, 2001). O trabalho é percursor no uso de modelo *quasi*-2D como apoio para a

tomada de decisão no que tange aos sistemas de drenagem e de esgoto, porém, não realiza a simulação integrada desses sistemas. Os resultados do modelo são apenas do sistema de drenagem, e o impacto sobre o sistema de esgotamento sanitário é feito em um pós-processamento. Os resultados do trabalho corroboram com a hipótese de que a implementação de sistemas unitários tem potencial de contribuir para a melhoria do saneamento ambiental, uma vez que, a adoção de captações em tempo seco, mitigam a contaminação gerada pelas contribuições irregulares de esgotamento sanitário no sistema de drenagem.

O Modcel se caracteriza por ser um modelo quasi-2D de células de escoamento, no qual cada célula comunica-se com células vizinhas por equações unidimensionais. O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros, livres ou afogados, a equação de escoamento através de orifícios, equações de escoamento através de bueiros, entre outras várias, sendo, neste estudo, considerados os efeitos de inércia no escoamento que ocorre nos cursos d'água principais. O escoamento ainda pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em tubulações ou galerias, estando as células da superfície e as da galeria associadas por uma ligação entre elas. Nas tubulações ou galerias, o escoamento é considerado inicialmente à superfície livre, mas pode vir a sofrer afogamento, passando a ser considerado sob pressão.

Câmara Metropolitana do Rio de Janeiro (2017): Assim como o PEMAPES da Bahia, o Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado (PEDUI) do Estado do Rio de Janeiro apresenta uma série de alternativas no que diz respeito ao estudo integrado das redes de drenagem e de esgotamento. Dentro do Plano de Ações Prioritárias o PEDUI propõe

- Implantação de redes de tempo seco em locais com sistema de separador absoluto atualmente existente ou em implantação, para interceptar as redes de drenagem e organizar os escoamentos para tratamento;
- Implantação da rede de tempo seco em locais sem rede de esgotamento sanitário como solução de transição para um sistema separador absoluto;

- Implantação de cinturão sanitário (e rede de drenagem, quando necessário) em locais sem rede de esgotamento sanitário como solução de transição para um sistema separador absoluto, adotando uma estratégia de gradualismo; e
- Implantação de cinturão sanitário em locais com sistema separador absoluto atualmente descaracterizado, com interconexão entre esgoto e drenagem, a fim de interceptar as redes de drenagem e encaminhar efluentes para tratamento antes da descarga no corpo receptor.

Coppetec (2018): A "Análise da viabilidade técnica e econômica da implantação de estruturas de captação de esgotos sanitários em tempo seco (CTS) e de tratamento de deflúvios poluídos (UTR), no âmbito da Área de Planejamento 4 da Cidade do Rio de Janeiro", desenvolvida em Parceria pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) apresenta uma série de alternativas para a gestão integrada dos sistemas de esgotamento e drenagem. O software utilizado para este estudo é o *Storm and Sanitary Analysis* (Autodesk, 2019) que se caracteriza por ser um modelo 1D de análise de hidrologia e de hidráulica, com a possiblidade de simular bueiros de drenagem e de esgoto sanitário. A partir da simulação foram analisadas 132 estruturas de captação em tempo seco. Os resultados obtidos apresentam a complexidade no dimensionamento das estruturas, por um lado a otimização das captações de tempo seco permite a captação um volume maior de águas residuais somadas às águas pluviais, porém, contribuem com maior vazão também ao sistema de esgotamento sanitário, sendo necessária uma análise específica para cada trecho do sistema de esgotamento que irá receber esse novo volume de águas. Apesar disso, o trabalho sugere que as 132 captações de tempo seco, propostas inicialmente, sejam mantidas visto o viés positivo que podem trazer sobre a qualidade dos corpos hídricos receptores.

Podemos observar que, por mais que nos últimos anos o Brasil tenha aumentado as discussões em relação ao estudo integrado dos sistemas de drenagem e esgoto, as discussões internacionais estão em outro patamar. Por outro lado, tanto para as experiências internacionais como para as nacionais, há demanda por ferramentas que possam simular de maneira adequada os dois sistemas. Não há publicações significativas sobre uma análise holística do problema, que considere o correto funcionamento das redes de drenagem (sem inundações e alagamentos), o correto funcionamento das redes de esgotamento, e a interação entre ambos, seja pelo impacto da drenagem no esgoto (CSO)

ou do esgoto na drenagem (contaminação dos corpos hídricos e deterioração do meio ambiente). Além disso, a simulação integrada dos sistemas, atualmente, demanda o acoplamento de diversos modelos ou, como já apresentado, as ferramentas que teriam o potencial de realizar estas simulações de maneira integrada necessitam de uma série de informações básicas que, na realidade dos países do terceiro mundo, não estão disponíveis.

2.6 Soluções baseadas na natureza

A utilização de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) tem como princípio fundamental a utilização de medidas inspiradas ou apoiadas na natureza, muitas vezes buscando mimetizar o seu funcionamento. O objetivo principal da adoção de SbN na paisagem urbana é reduzir parte dos impactos negativos da ação antrópica, atuando de forma simultânea sobre aspectos ambientais, sociais e econômicos. De forma geral, a utilização dessas soluções vem se intensificando ao redor do mundo, ao passo que são observadas as vantagens decorrentes da sua aplicação no meio urbano. Segundo Herzog & Rosa (2010), a infraestrutura verde[2] pode ser entendida como uma abordagem multidisciplinar e sistêmica, com baixo impacto na paisagem e potencial de redução das pegadas ecológicas das cidades, além de contribuir com a conservação e a preservação de ecossistemas como os corpos d'água.

As SbN podem ser entendidas como uma abordagem integrada a políticas de gestão e ações, ou a outras soluções, como a restauração ecológica, a adaptação baseada no ecossistema, infraestruturas e medidas de conservação ambiental, podendo serem realizadas na escala local, onde acontecem as dinâmicas e especificidades de um determinado problema (COHEN-SHACAM *et al*., 2019). O conceito de implantação de SbN insere-se na abordagem da Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE), que se apresenta como uma política multiescalar onde um ecossistema auxilia o processo de adaptação humana para os impactos esperados da mudança climática. Dessa forma, utiliza

[2] Segundo Pötz *et al*., (2016) a cidade é composta por quatro grandes sistemas: (1) a infraestrutura azul, que corresponde aos canais, rios, lagos, lagoas e outros recursos hídricos; (2) a infraestrutura verde, com parques e áreas naturais; (3) a infraestrutura cinza, que corresponde às rodovias, linhas de tráfego e áreas de estacionamento; e (4) a infraestrutura vermelha, composta pelas edificações.

abordagens como as SbN para reduzir a vulnerabilidade da comunidade ou do sistema urbano. A AbE pode ser vista como uma forma sistêmica de buscar sustentabilidade e resiliência urbana a partir da conexão de duas dimensões: a ambiental e a social (Scarano, 2017). Quando considerados os impactos potenciais da mudança do clima, abordagens de adaptação são comumente associadas às SbN, avançando em direção aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e promovendo a integração humano-natureza por meio do uso da infraestrutura verde-azul (Albert *et al*., 2020; Rosenzweig *et al*., 2018).

Nesta linha de atuação, sistemas de espaços livres podem ser desenhados como infraestruturas verdes (BENEDICT & MCMAHON, 2002) ou infraestruturas verde-azuis (LIAO *et al*., 2017; KOZAK, 2020), quando incorporado ao projeto aspectos hidrológicos, de biodiversidade, recreação e ainda aprimoramento estético, de forma integrada e conectados em diferentes escalas (multiescalar). A conexão entre as diferentes soluções propostas para composição da infraestrutura verde-azul, considerando a combinação de componentes e dispositivos com escalas de atuação distintas é imprescindível para o correto do funcionamento do sistema proposto, evitando a instalação de diversos projetos aleatórios, segmentados e sem relação (BENEDICT & MCMAHON, 2002). Porém, vem sendo apresentado melhores resultados aqueles sistemas que combinam as soluções de infraestruturas verde-azuis em conjunto com infraestruturas cinzas (BENEDICT & MCMAHON, 2002; KOZAK, 2020), possibilitando uma reorganização mais eficiente dos escoamentos superficiais decorrentes de eventos hidrológicos, intensificados pelo processo de urbanização, por meio da adoção integrada de medidas de adaptação e resistência às cheias (MIGUEZ *et al*., 2018).

Nesse contexto, destaca-se que o termo infraestruturas verdes-azuis deriva do conceito de infraestruturas verdes, ambos englobando o conceito geral das SbN (NCUBE e ARTHUR, 2021).

2.7 Infraestrutura verde e azul

Para o equilíbrio da cidade deve ser empregada uma lógica multisetorial na qual a sustentabilidade de determinado conglomerado urbano dependa da densidade de conexões dos espaços verdes (Vegetações) e azuis (Rios). Como sistemas integrados, a infraestrutura verde e azul pode reduzir o escoamento, aumentar a biodiversidade e oferecer benefícios culturais / de saúde através do acesso público a valiosos recursos naturais (BACCHIN, *et al*., 2014), além de gerar as conexões necessárias para os espaços livres naturais fragmentados e opções para tratamento de águas residuais.

A infraestrutura verde e azul, utilizando paisagens multifuncionais, surge como alternativa para alcançar uma solução mais natural para os rios em áreas urbanas, com desdobramentos positivos para a sociedade. Vale destacar que as falhas trazidas ao sistema de drenagem e pelo sistema de esgotamento sanitário, pelo incorreto desenvolvimento urbano, geralmente são corrigidas pela adoção de infraestrutura cinza (NIEZGODA & JOHNSON, 2005). Essas estruturas podem corrigir determinados problemas da cidade (EVERARD & MOGGRIDGE, 2012), mas, em geral, compreendem processos rígidos e não adaptativos, ao contrário das infraestruturas verdes e azuis, que são mais adaptáveis e flexíveis (VOSKAMP & VAN DE VEN, 2015). O termo infraestrutura verde começou a ser difundido em 1994 com a ideia central de que é importante incluir os sistemas naturais como componentes da infraestrutura (FIREHOCK, 2010). Essas estruturas naturais foram amplamente testadas e provaram ser bem-sucedidas em proporcionar uma maior sustentabilidade urbana quando comparadas às tradicionais (BENEDICT & MCMAHON, 2012). Embora infraestrutura verde seja um termo recorrente, Perini e Sabbion (2016) destacam que a definição de infraestrutura verde e azul (GBI) tem sido cada vez mais utilizada para englobar todas as estratégias possíveis para construir a resiliência urbana e o foco nos corpos d'água está na vanguarda da inovação em técnicas e resultados de infraestrutura urbana.

2.8 Water Sensitive Urban Design

Water Sensitive Urban Design (WSUD) se baseia no desenvolvimento urbano sob uma abordagem que integre e respeite o ciclo hidrológico local. Para isto deve ser realizada uma adequada gestão das águas pluviais e das águas residuais, além das águas de abastecimento e as águas subterrâneas. O conceito desenvolvido nos anos 90 na Austrália

difere-se dos demais conceitos por ter como principal objetivo a adoção de soluções economicamente viáveis com o menor impacto ao meio ambiente possível (MELBOURNE WATER, 2005).

Levando em conta os objetivos mais comuns apresentados nesta temática, é possível destacar para o presente trabalho a mitigação de efluentes gerados pela cidade e o seu adequado tratamento, o correto tratamento das águas pluviais antes do seu aporte aos corpos hídricos receptores mantendo a sua devida qualidade ambiental, e uma melhor interface entre os recursos hídricos e a população urbana (MORGAN *et al*., 2013).

O WSUD engloba duas práticas que garantem sua adequada implementação no ambiente urbano. As Melhores Práticas de Planejamento (*Best Planning Practices* - BPPs) e as Melhores Práticas de Gestão (*Best Management Practices* - BMPs).

As BPPs são definidas como a melhor abordagem prática de planejamento para alcançar ou contribuir para os objetivos de gestão definidos em situação urbana, levando em conta especificidades físicas e naturais do local em estudo.

As BMPs são definidas como ações estruturais e não estruturais que executam as funções de prevenção, coleta, tratamento, transporte, armazenamento e reutilização das águas urbanas. Dentro deste grupo podemos destacar as seguintes ações:

- Bacias de sedimentos
- Bacia de Biorretenção
- Filtros de areia
- Wetlands
- Lagoas
- Sistemas de Infiltração
- Armazenamento e Recuperação de Aquíferos
- Pavimento Permeáveis
- Bacias de Amortecimento ou Retardo
- Telhados verdes
- Reabilitação de cursos d’água e mata ciliar
- Programas de Educação da Qualidade da Água

2.9 Wetlands construídos

Wetlands construídos (WC) podem ser considerados sistemas que replicam e otimizam os processos naturais de alteração da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (BRASIL, 2018). No ambiente natural é comum que estes processos ocorram em pântanos ou mangues.

Vale destacar que os wetlands construídos são comumente aplicados para o sistema de esgotamento sanitário com foco no tratamento de efluentes de diversas origens. Por outro lado, recentemente, estas intervenções têm ganhado outras atribuições como o controle de enchentes, retenção de sedimentos e restauração de rios urbanos poluídos (BRASIL, 2018). Como principais benefícios de sua implementação destacam-se o baixo custo de capex e opex, operação relativamente simples, elevada eficiência na remoção de poluentes, principalmente quando comparado a soluções individuais como tanque séptico, e estabilidade na sua performance de tratamento diante de variáveis operacionais (BRASIL, 2018).

O Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC, 2021) apresenta os principais tipos de Wetlands construídos de maneira compilada na Figura 2-14. É possível observar dois grandes grupos de Wetlands construídos: Escoamento subsuperficial e escoamento superficial. Dentro do grupo de escoamento subsuperficial é possível encontrar Wetlands Construídos Horizontais (WCH) e Wetlands Construídos Verticais (WCV), além da possibilidade de sistemas híbridos.

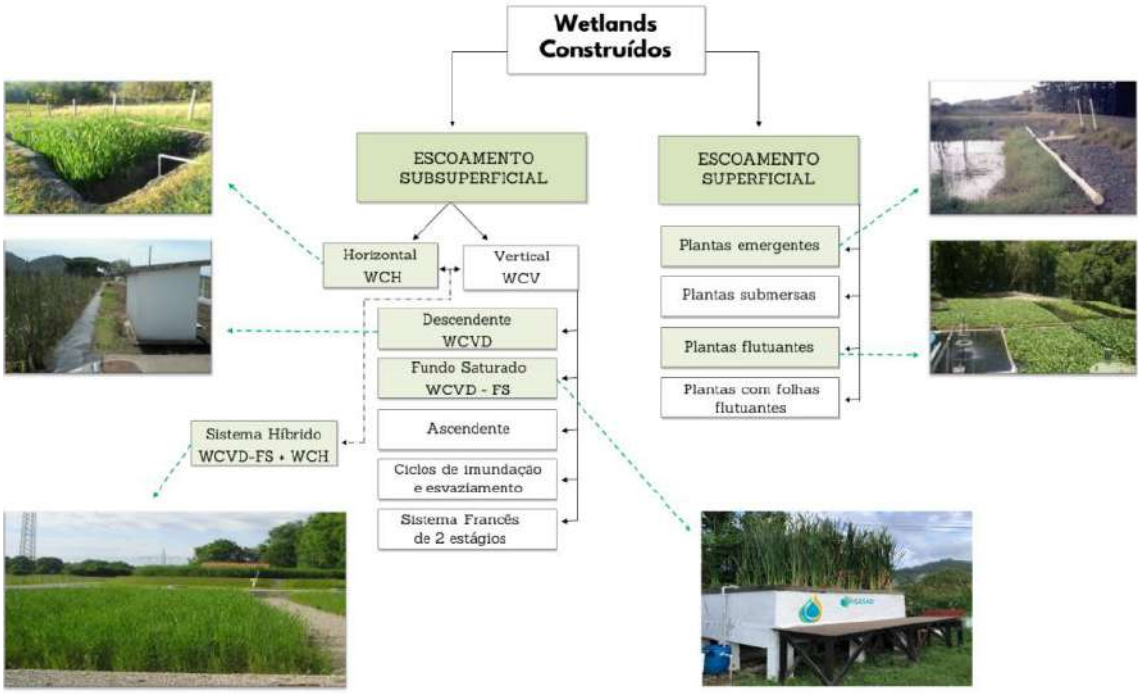

Figura 2-14. Classificação dos wetlands construídos com destaque as modalidades mais recorrentes no Brasil. Fonte: PPGEA/UFSC, 2021, adaptado de Vymazal e Kroepfelová (2008).

Como apresentado por PPGEA/UFSC (2021), os WCH são módulos conformados por materiais filtrantes que possuem índices físicos que favorecem o escoamento da entrada da contribuição de esgoto, até sua saída na outra extremidade. Assim, é potencializado o escoamento longitudinal horizontal, facilitado por uma declividade no fundo. Adicionalmente são plantadas macrófitas emergentes. Um esquema deste tipo de wetland pode ser visto na Figura 2-15

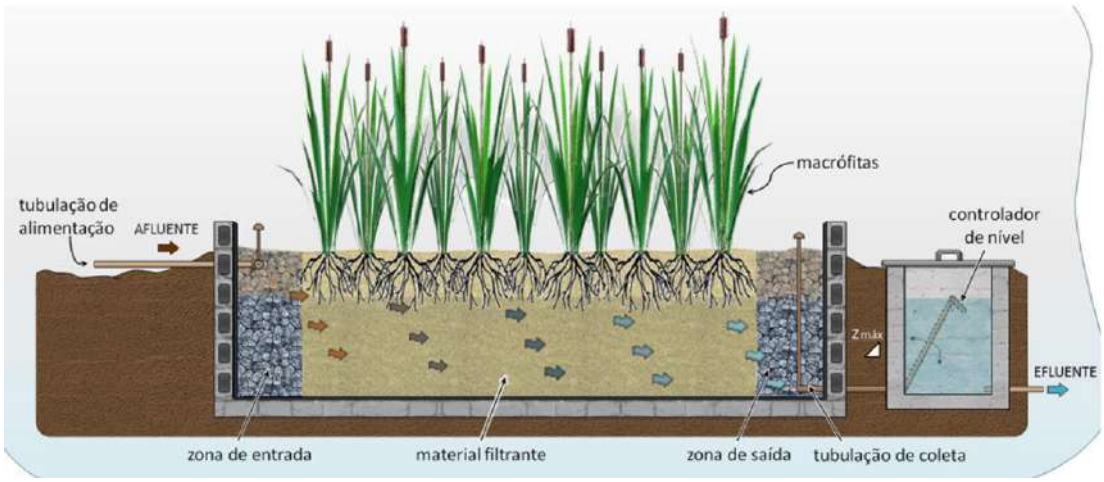

Figura 2-15. Esquema representativo de um perfil longitudinal do wetlands construído de escoamento subsuperficial horizontal – WCH.
Fonte: PPGEA/UFSC, 2021, adaptado de Acervo GESAD.

Por outro lado, PPGEA/UFSC (2021) cita que a principal diferença para as WCV está na forma de alimentação. A contribuição do esgoto ocorre verticalmente, de maneira intermitente, favorecendo a contribuição de oxigênio e gerando um ambiente favorável para bactérias autotróficas nitrificantes, o que ocasiona um nível de tratamento secundário avançado. Vale destacar que este tipo de metodologia é mais adequado para a contribuição de esgoto bruto, de maneira a não colmatar o sistema (LANA *et al*., 2013). Como principais vantagens do WCV em relação ao WCH destaca-se uma menor área de implantação, além de não ser demandado tratamento primário (SOUZA, 2021).

A Figura 2-16 apresenta, de maneira esquemática, o perfil vertical do wetland construído de escoamento vertical.

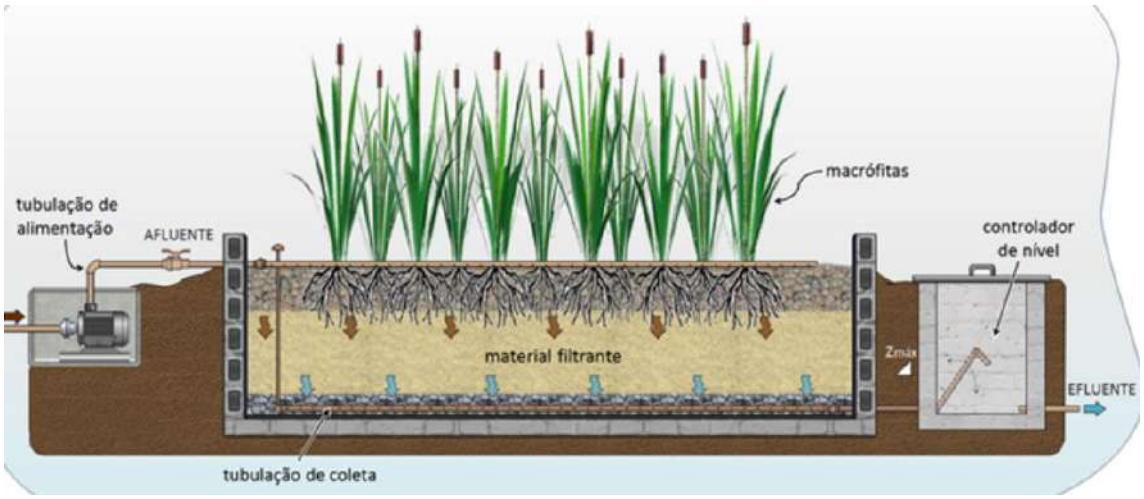

Figura 2-16. Esquema representativo de um perfil vertical do wetland construído de escoamento vertical – WCV.
Fonte: PPGEA/UFSC, 2021, adaptado de Acervo GESAD.

Vale destacar que pesquisas recentes indicam que o método francês de WCV se apresenta como uma alternativa eficiente em termos de qualidade da água efluente e da área demandada para sua construção na realidade brasileira (SHINOHARA, 2021; RODRIGUES, 2021). Vale destacar que este método é amplamente utilizado na França e apresenta resultados significativos (MORVANNOU *et al*., 2015). Além de diminuir a área ocupada, este método realiza a dispersão do afluente por sifão invertido, não sendo demandado bombeamento, e consequentemente, reduzindo o custo de operação.

Lana *et al*. (2013) apresentaram que para esta metodologia a área necessária para implementar a WC, simplificada para a realidade brasileira (considerando o atual estado de degradação dos nossos corpos hídricos), seria de cerca de 1 m² por habitante. Além disso, o estudo mostra que em sua maneira mais simplificada, esta alternativa pode gerar uma eficiência de 77% de remoção de DQO, 83% de redução de sólidos em suspensão e 59% de redução em Nitrogênio Total Kjeldahl (combinação da amônia e do nitrogênio orgânico).

3 METODOLOGIA

Este item expõe os procedimentos metodológicos acessados no presente trabalho. Sendo assim, o capítulo 3 apresenta os principais elementos da metodologia, e para seu entendimento na íntegra, sua leitura deve ser acompanhada do capítulo seguinte de avaliação da potencialidade da metodologia, no qual, de maneira prática, é aplicado o processo metodológico em uma bacia piloto.

A metodologia parte da utilização do Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) desenvolvido por Miguez (2001) e amplamente aplicado para a simulação de cheias urbanas do sistema de macrodrenagem e, ainda, frequentemente utilizado para a simulação de redes de microdrenagem.

O MODCEL trabalha com o conceito de células, apresentado na década de 1960, por Zanobetti, Lorgerè, Preissman e Cunge (1970). As células são compartimentos articulados, capazes de representar a superfície da bacia, incluindo a rede de drenagem. Essas células têm capacidade de armazenagem e apresentam características topográficas e de uso do solo, que permitem um processo de transformação chuva-vazão (sendo usualmente utilizado o método racional). A integração desses compartimentos forma uma rede de escoamentos e é responsável pela representação física da bacia e dos elementos da paisagem urbana. A iteração entre as células ocorre através de diferentes leis hidráulicas que serão melhor apresentadas a seguir.

Sendo considerado como um modelo *quasi*-bidimensional, o MODCEL é capaz ainda de articular, verticalmente, o plano do sistema de drenagem, e como proposto pelo presente trabalho, o plano do sistema de esgotamento sanitário de maneira conjunta. A escolha deste modelo permite, assim, representar toda a rede hidrográfica e integrar seu funcionamento com o processo de transformação de chuva em vazão, bem como sua interação com a infraestrutura dos sistemas de drenagem e esgoto.

A natureza e a infraestrutura da cidade podem ser representadas por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento. Dessa forma, o território é subdividido em células, formando uma rede de escoamento bidimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções, utilizando relações unidimensionais de câmbio hidráulico. Há no modelo um conjunto tipo base de células pré-definido capaz de representar as heterogeneidades do território. A seguir, o presente trabalho trará de

maneira mais específica os tipos de células que serão utilizados para desenvolvimento da metodologia proposta.

Célula de rio, ou canal: Células que representam o caminho principal por onde se desenvolve o escoamento da drenagem a superfície livre, podendo ser de seção simples ou composta. Caso seja de seção simples, o acúmulo de água ocorre em um compartimento prismático. Para seção composta, o acúmulo de água pode ocorrer em diferentes patamares. A definição da divisão de células de rio/canal ocorre levando em conta regiões homogêneas do curso d'água, cujas características de declividade, coeficiente de rugosidade e geometria são similares. A presença de estrangulamentos indica um local propício para a interrupção das células no sentido perpendicular ao escoamento, assim, estes estrangulamentos podem representar a conexão entre duas células de canal/rio, uma vez que se trata da seção hidráulica mais restritiva. A Figura 3-1 apresenta de maneira esquemática a divisão de uma célula de escoamento do tipo rio/canal e a representação da seção simples ou composta.



Figura 3-1. Representação esquemática das células de rio/canal e apresentação do corte da seção transversal. O corte apresenta a opção (a) de representação de seção simples e a opção (b) de representação composta. Fonte: Elaboração própria.

Célula de planície urbanizada: Utilizada para representar os escoamentos e acúmulos de água em áreas urbanas. A célula é delimitada inicialmente pela topografia e por divisores de água do próprio processo de urbanização (edificações, vias etc.). Demais fronteiras da célula podem ter conexão com outras células de escoamento. Adicionalmente, é necessário comunicar a parcela da célula que irá armazenar água. Assim, a área total da célula é informada para o processo de transformação de chuva em vazão e a área de

armazenamento representa a parcela da célula na qual os escoamentos e alagamentos se desenvolvem. Para esta célula são informados ainda patamares de acúmulo que dependem das características de urbanização da região, sendo eles: nível médio das calçadas; nível médio das edificações; parcela média de ruas por célula; e parcela média de calçadas mais parques e jardins por célula. A Figura 3-2 apresenta de maneira esquemática o processo de divisão de células de planície urbanizada.

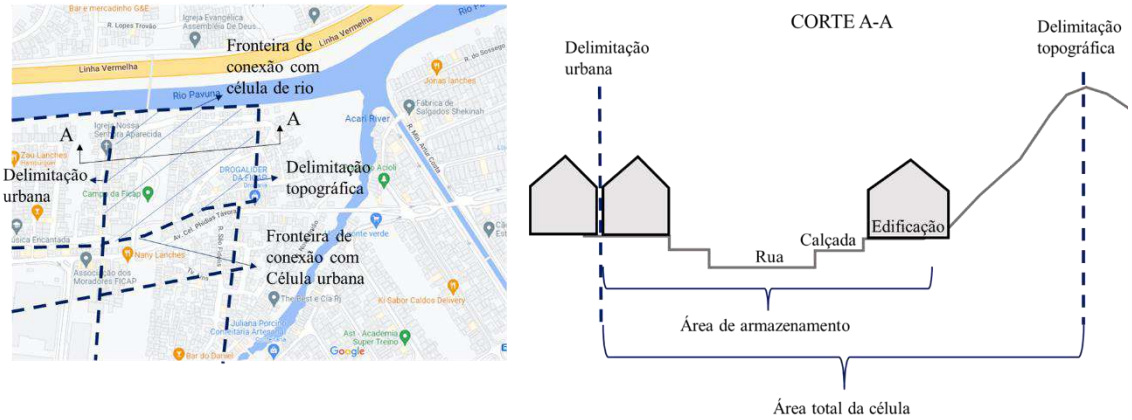

Figura 3-2. Representação esquemática do processo de divisão de células de planície urbanizada. Fonte: Elaboração própria.

Células de planície natural, não urbanizada: Análoga ao tipo anterior, porém com geometria prismática, sem nenhum padrão particular de variação de sua superfície de fundo. As informações de área total e área de armazenamento também são informadas. Vale destacar que este tipo de célula pode ser adaptado para a representação de poços de visita e coberturas das edificações, os quais possuem área total igual a área de armazenamento. A Figura 3-3 apresenta de maneira esquemática a seção de uma célula do tipo planície natural, não urbanizada.

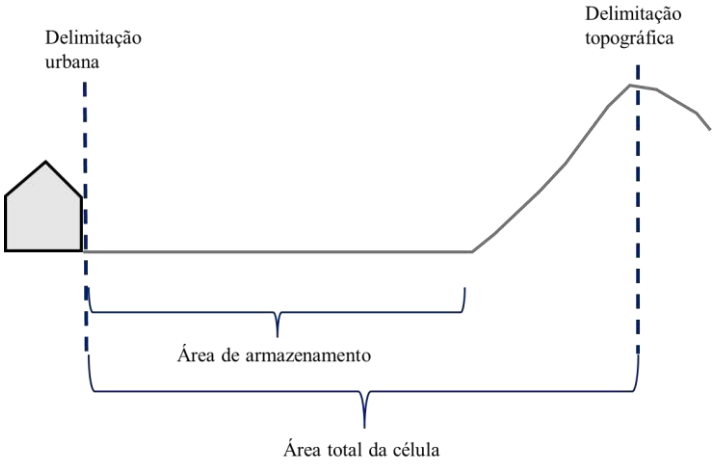

Figura 3-3. Representação esquemática do processo de divisão de células de planície natural, não urbanizada. Fonte: Elaboração própria.

Célula de reservatório: Representa uma parcela do território a partir de uma curva cota x área superficial. Dessa forma, informando a variação de profundidades, pode ser determinada a variação de volumes armazenados na célula de escoamento. Este tipo de célula possui potencial de representar reservatórios para amortecimento de cheias, mas também pode ser utilizada para representar alagados construídos (*Wetlands*) que podem favorecer o acúmulo e tratamento das águas urbanas. A Figura 3-4 apresenta de maneira esquemática uma seção de uma célula do tipo reservatório.

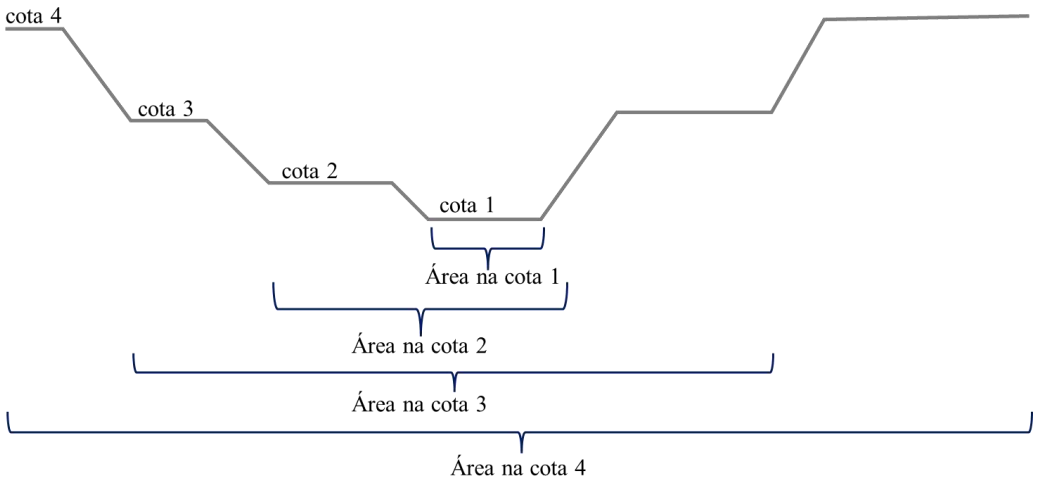

Figura 3-4. Representação esquemática das células do tipo reservatório.

A partir da divisão de células, é definido o centro das células de escoamento. O posicionamento do centro de células deve ser o ponto no qual os escoamentos são concentrados na região de interesse. Esta determinação é necessária uma vez que o

modelo é unidimensional, e desta forma, é necessário informar o centro que irá representar a região delimitada.

Após a definição de células e centros, são definidas as comunicações entre células, conectando os centros. Nesta etapa é necessário entender como ocorre a conexão entre células e qual será a conexão predefinida que melhor representara o fluxo em questão. As ligações típicas de escoamento entre células, que podem ser escritas em função de leis hidráulicas, são listadas a seguir:

Ligação tipo rio (representadas pela letra C no modelo), para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint Venant, incluindo seus termos de inércia;

Ligação tipo planície (representadas pela letra P no modelo), para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint Venant, sem os termos de inércia;

Ligação tipo vertedouro de soleira espessa (representadas pela letra V no modelo), considerando a equação clássica, para escoamento livre ou afogado;

Ligação tipo orifício (representadas pelo código O1 no modelo), também clássica;

Ligação tipo galeria (representadas pelo código G2 para geometria circular e G3 para geometria celular no modelo), com escoamento à superfície livre ou sob pressão;

Ligação tipo curva cota x descarga, que pode representar estruturas especiais calibradas em laboratório físico (modelos reduzidos), ou curvas-chave conhecidas;

Ligação tipo descarga de galeria em rio (representadas pela letra S no modelo), funcionando como vertedouro, livre ou afogado, ou orifício, para galerias que chegam a um rio em cota superior ao fundo deste, por uma das margens;

Ligação tipo ralos ou boca de lobo de microdrenagem (representadas pelo código M2 no modelo), como interface das células superficiais com as células de galeria;

Ligação tipo bombeamento (representadas pela letra B no modelo), com descarga de uma célula para outra a partir de uma cota de partida;

Ligação tipo comporta flap (representadas pela letra F no modelo), funcionando como este tipo de comporta de sentido único de escoamento.

A aplicação da metodologia parte da utilização dos tipos de célula e de ligações existentes para simular a rede de esgotamento sanitário. Esta rede, por sua vez, deverá ser integrada aos demais sistemas urbanos, já consolidados na representação por células de escoamento.

Assim, podem ser consideradas três camadas de simulação. A primeira, a camada superficial, que representa o escoamento pelos cursos d'água, pelas ruas e espaços livres da bacia, bem como seu acúmulo em depressões e em regiões com dificuldades de drenagem. Esta primeira camada diz respeito ao objetivo inicial de modelos do tipo de células.

A segunda camada diz respeito à consideração dos escoamentos subsuperficiais que ocorrem nos elementos do sistema de drenagem. Miguez (2001) adapta a representação do modelo de células de escoamento para realizar esta simulação e integrá-la com a primeira camada.

Problemas práticos de engenharia urbana mostram que a interação entre as águas urbanas, principalmente as águas pluviais e os esgotos sanitários, são uma realidade constante e necessitam de maneira urgente de um tratamento. Porém, o dimensionamento em separado das redes e a verificação hidrodinâmica individual do funcionamento das redes não permitem observar o problema em sua plenitude. Além disso, a consideração de espaços livres na bacia e sua incorporação às soluções dos problemas de ambos os sistemas deve ser levada em conta, tendo em vista que cada vez mais há a necessidade de procurar soluções externas à rede, observando o território.

Desta forma, o MODCEL se apresenta como uma ferramenta com o potencial de possibilitar a integração das redes e incluir no processo de simulação a camada superficial, na qual são verificados os maiores impactos de interação entre os sistemas e, em contrapartida, onde podem também surgir soluções não convencionais (fora das redes) para os problemas verificados.

Vale destacar, contudo, que a simulação integrada começa desde a abordagem inicial do problema. A mudança de paradigma do tratamento individualizado das redes tem que ser

tratada desde a obtenção de dados para o processo de modelagem e desde a modelagem conceitual do problema. Segundo Rosman (2001) a modelagem conceitual de um fenômeno físico de interesse deve preceder o processo de modelagem computacional (ou seja, qual for o modelo a ser utilizado), e dela depende o sucesso ou fracasso de uma correta representação dos resultados a serem obtidos. Esta etapa corresponderá à Etapa 1 da metodologia. Nesta etapa também serão desenvolvidos os demais estudos preliminares para tratamento dos fenômenos em questão, bem como estudadas conceitualmente possíveis soluções para os problemas observados.

Com a Etapa 1 concluída, dá-se início à etapa que corresponde à Simulação Hidrodinâmica Multicamadas com o Modelo de Células de Escoamento (MODCEL-SHIM). Esta Etapa 2 tem como objetivo preparar a base de simulação MODCEL-SHIM que corresponde à representação adequada das diversas camadas e à suas conexões representadas de maneira coerente com a realidade observada. Aqui serão mapeadas sob o ponto de vista hidrodinâmico as principais interações entre os sistemas de drenagem e esgoto e suas consequências para o território.

A Etapa 3, por sua vez, trata da análise de qualidade das águas urbanas pela interação entre os sistemas. Sua aplicação depende dos resultados obtidos na Etapa 2. Inicialmente, esta etapa foi desenvolvida levando em conta o modelo completo de DBO e OD em cursos d'água, que complementarmente ao modelo de Streeter-Phelps, considera a conversão de amônia a nitrato e a sua implicação no consumo de OD (Von Sperling, 2014). O desenvolvimento desta etapa pode ser dispensado caso não seja demandada uma análise da qualidade da água pela interação entre os sistemas. Diversos casos práticos, como o apresentado no capítulo 5, podem requerer apenas a aplicação da Etapa 2, em complemento à aplicação da Etapa 4, apresentada a seguir.

A Etapa 4 da metodologia finaliza o processo metodológico proposto e nela são realizadas proposições de soluções de maneira integrada – compartilhadas, ou pensadas em conjunto – para os sistemas, diante dos problemas identificados e simulados nas etapas anteriores.

A Figura 3-5 apresenta a estrutura geral da metodologia proposta em um fluxograma resumido. Complementarmente, serão descritas de maneira mais detalhada as etapas da metodologia nos tópicos a seguir.

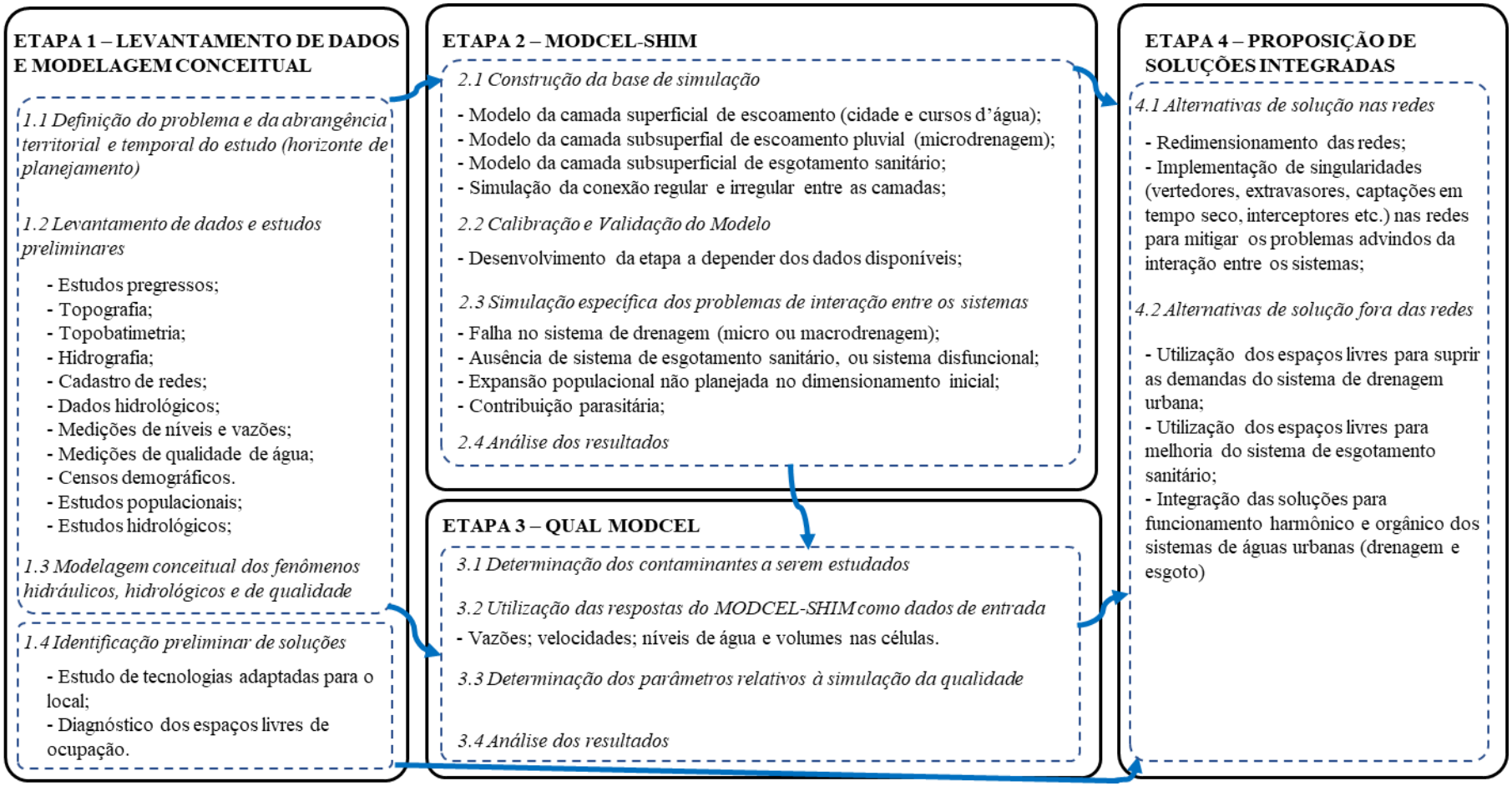

Figura 3-5. Fluxograma da metodologia proposta para simulação integrada dos sistemas de drenagem urbana e esgotamento sanitário.
Fonte: Elaboração própria.

3.1 ETAPA 1 – Diagnóstico conceitual do funcionamento dos sistemas de drenagem urbana e esgotamento sanitário, identificando possíveis problemas e avaliando, também, conceitualmente, a extensão das intervenções requeridas

A primeira etapa parte do problema a ser estudado. É então delimitada a bacia hidrográfica e a bacia de esgotamento sanitário do sistema, de maneira a entender o problema em questão em sua plenitude e estimar as possibilidades de impactos sistêmicos e recíprocos dos sistemas em funcionamento. Além disso, é também nesta etapa em que é feito um desenho inicial das alternativas de solução a serem propostas. Também é estudado o horizonte de planejamento do projeto ou estudo, principalmente para o sistema de esgotamento sanitário. A consideração de um horizonte de planejamento para o sistema de drenagem não é habitual, mas sua avaliação pode ser importante uma vez que, caso o processo de urbanização seja significativo no período estudado, será verificado um incremento no volume de escoamento superficial e um provável aumento das vazões de cheia, principalmente se soluções tradicionais forem adotadas.

Preliminarmente será enquadrado o problema em algum tipo de interação entre os sistemas, classificado quanto a sua origem, a saber:

- Falha completa do sistema de microdrenagem;
- Falta de manutenção do sistema de drenagem;
- Ausência de sistema de esgotamento sanitário;
- Expansão populacional não planejada no dimensionamento do sistema de esgotamento; e
- Contribuição parasitária do sistema de drenagem pluvial residencial.

Vale destacar que poderão ser observados problemas ocorrendo em paralelo, o que demandará a aplicação mais específica da metodologia. A simulação de cada problema pode ser vista no capítulo de “Avaliação da Potencialidade da Metodologia”. A ferramenta ainda poderá ser utilizada para outros fins não mapeados no presente trabalho. Além disso, a metodologia tem o potencial de, para em casos de uma nova urbanização, servir como ferramenta de dimensionamento, prevendo possíveis interações e evitando problemas advindos da conexão não esperada dos sistemas.

Para o desenvolvimento das etapas seguintes é fundamental o levantamento de dados base de simulação como os apresentados previamente na Figura 3-5, com destaque para as

informações topográficas, topobatimétricas e planialtimétricas – principais responsáveis pela divisão de células de escoamento da camada superficial –, bem como informações de uso e ocupação do solo, tipo do solo e declividade. Essas informações poderão ser utilizadas para determinação do coeficiente de escoamento superficial, ou para embasar qualquer outro modelo de transformação de chuva em vazão não explorado no presente trabalho, como o parâmetro *Curve Number* (CN).

Além disso, deverão ser levantados cadastros de redes ou, se possível, levantamentos expeditos, os quais irão subsidiar a divisão de células de escoamento das camadas subsuperficiais de drenagem urbana e de esgotamento sanitário. Levantamentos hidrometeorológicos também são fundamentais de serem acessados, uma vez que é a partir deles que é realizado o processo de calibração e validação dos modelos da Etapa 2, considerando medições de níveis e vazões, e da Etapa 3, considerando medições de qualidade. A construção das bases de modelagem apresentadas nas etapas seguintes levará em conta parâmetros, na maioria das vezes, hipotéticos, a menos que os dados locais para a bacia simulada estejam disponíveis para uso na calibração e na validação.

Finalmente, deverão ser pesquisados projetos ou estudos antigos que possam auxiliar na elaboração das etapas e, ainda, deverão ser desenvolvidos estudos populacionais para verificação da contribuição de esgoto, bem como estudos hidrológicos para determinação do regime pluviométrico e principais variáveis envolvidas no processo de formação de chuva em vazão, cujo escoamento superficial irá contribuir para o território estudado.

Nesta primeira etapa de avaliação também é identificado o alcance desejável do estudo em relação à aplicação das etapas subsequentes da metodologia proposta. Determinados problemas de diagnóstico poderão ser resolvidos apenas com a aplicação da Etapa 2, que pretende entender a interação entre as águas urbanas. Outros problemas que demandam o mapeamento da qualidade da água e análise do efeito de proposições combinadas de drenagem e esgotamento sanitário demandarão a aplicação da próxima etapa proposta na metodologia, ou seja, avançando para a Etapa 3.

Nesta etapa também serão pensadas, de maneira preliminar e conceitual, possíveis soluções para os sistemas, principalmente utilizando o território como tratamento complementar ao funcionamento inadequado visto nas redes. Para auxiliar este processo,

um diagnóstico dos espaços livres da região de interesse precisará ser desenvolvido. Estas soluções serão simuladas na Etapa 4.

3.2 ETAPA 2 - Desenvolvimento do MODCEL-SHIM

A Etapa 2 se refere ao desenvolvimento de método de Simulação Hidrodinâmica Multicamadas (MODCEL-SHIM), integrando os sistemas de drenagem urbana, esgotamento sanitário e escoamentos superficiais (escoamento por ruas e espaços livres) e utilizando, para tanto, o Modelo de Células de Escoamento-MODCEL (Miguez, 2001, 2017).

O modelo surge como alternativa de simulação integrada das redes em situações nas quais não há dados topográficos detalhados, na escala desejável, e/ou dados de cadastros de redes disponíveis em sua plenitude, como muitas vezes pode ser observado no Brasil. Esta ausência é um problema que pode ser solucionado pela experiência do modelador, porém, ela também impede o uso de alguns recursos de modelagem que requerem uma extensa base de dados para execução, como modelos em duas ou três dimensões (Oliveira, 2018).

O MODCEL é um modelo hidrodinâmico *Quasi*-2D com vocação para a simulação de escoamentos pelas redes de drenagem e/ou considerando possíveis falhas e fluxos ou armazenamentos fora da calha dos cursos d'água, fundamental para a análise de drenagem urbana. Além disso, no presente trabalho é proposta a utilização do modelo para simular as redes de águas urbanas (esgoto e drenagem) e, desse modo, observar possíveis problemas de interação.

Como primeiro passo desta etapa deverá ser dividido o território em células de escoamento, que são compartimentos homogêneos e funcionam de forma integrada comunicando-se apenas por leis hidráulicas unidimensionais. Esta divisão inicial será utilizada para a representação da camada superficial. O presente trabalho recomenda que o grau de discretização da camada superficial seja na escala de rua e lote, uma vez que é necessário que esteja o mais compatível possível com a discretização das camadas subsuperficiais, que serão representadas na escala de poço de visita (drenagem e esgoto). Dessa maneira, para esta primeira camada teremos a representação por células de escoamento de ruas, lotes, e cursos d'água. Será necessário também realizar a representação de telhados dos lotes edificados, de modo a prever a possibilidade de

conexão destes diretamente ao sistema de drenagem, quando em situações regulares, ou ao sistema de esgotamento sanitário, para situações parasitárias.

O próximo passo da Etapa 2 consiste na preparação da camada subsuperficial cuja base hidrodinâmica será responsável pela representação das redes pluviais urbanas. As redes de drenagem serão discretizadas em células de escoamento que irão representar os poços de visita (PV) de drenagem. Neste tipo de representação, as galerias passam a ser simuladas por conexões hidráulicas entre as células de PV. Para representar o acúmulo de água em galerias, caixas-ralo e demais estruturas hidráulicas do sistema de drenagem, será acrescida uma área proporcional nas células de PV para simular adequadamente os níveis do escoamento verificados no sistema. Serão incorporadas no modelo as ligações características entre a camada de microdrenagem e a camada superficial.

No passo seguinte desta etapa, com a camada superficial e subsuperficial de drenagem funcionando integradamente, é realizada a calibração e validação do modelo, levando em conta as informações disponíveis para tal. Dentro do processo de modelagem, calibração e validação são duas etapas que devem anteceder a simulação para prospecções (TEJASWINI & SATHIAN, 2018). A qualidade e disponibilidade de dados são aspectos relevantes para o referido processo, isso porque escolhas e suposições feitas durante o processo de modelagem podem ameaçar a representatividade dos resultados obtidos (HURFORD *et al*., 2010).

Nesta etapa, medições de níveis e vazões podem ser utilizados como referência. Também é possível usar registros de extravasamentos de bueiros, poços de visita e demais estruturas hidráulicas. A escassez e a incerteza dos dados disponíveis são os principais fatores limitantes para uma correta avaliação das águas urbanas, mas isso pode ser resolvido por meio de adaptações de modelos para compensar a incompletude dos dados (ESPINOSA & OTTERPOHL, 2014). O MODCEL surge novamente como ferramenta capaz de compensar esta ausência de dados (OLIVEIRA *et al*., 2019). É possível realizar adaptações ou simplificações no modelo apoiadas em interpretações físicas e no conhecimento do problema, sem perder (de forma significativa) a representatividade dos fenômenos.

Com o modelo hidrodinâmico de escoamento pluvial calibrado (e validado), caso estejam disponíveis informações ou registros para tal, o próximo passo da Etapa 2 da metodologia

é a simulação dos elementos dos Sistema de Esgotamento Sanitário (SES). No que diz respeito à sua representação integrada com as camadas desenvolvidas anteriormente, esta é a principal contribuição do trabalho aqui exposto.

Para a representação da rede de esgotamento sanitário, serão identificados os poços de visita (PV) representados pelas de células de escoamento para inclusão no MODCEL. Como realizado para o sistema de microdrenagem, os PVs de esgoto terão um acréscimo de área devido à representação do acúmulo de água em outras singularidades não diretamente representadas no modelo tais como Caixas de Passagem, Terminais de Inspeção, Caixas de Inspeção etc. Além disso, o acúmulo de esgoto nas tubulações, apesar de pequeno, também será acrescido em termos de área para as células de PV de esgoto. Os PVs de esgoto sanitário, cuja área será ponderada para representar acúmulo de água nos PVs e demais singularidades, serão conectados por equações hidráulicas para seções circulares, que podem trabalhar tanto à superfície livre (nas condições de projeto), como sob pressão (nas condições de falha), respeitando seu material e dimensões, cuja correspondência no MODCEL-SHIM será realizada pela ligação G2 do MODCEL. Os coeficientes de Manning para o escoamento nestas tubulações circulares serão avaliados caso a caso, assim como desenvolvido para os cursos d'água, para as planícies, para as ruas e para as galerias de drenagem, das camadas anteriores.

Para representar a entrada de água pluvial no SES ou contribuição de esgoto para a superfície, os poços de visita modelados serão conectados às suas respectivas células de superfície, representativas de porções urbanas, onde, em caso de alagamento, a água poderá se acumular e entrar na rede, e em caso de sobrecarga hidráulica, as redes de esgoto irão contribuir de baixo para cima. Esta conexão poderá ser realizada em diversos níveis e através de diversas singularidades do SES. As principais contribuições serão realizadas pelos tampões dos PVs de esgoto, localizados nas ruas ou calçadas, a depender do traçado do SES local. Além disso, caso os alagamentos tenham maior amplitude, ou a rede de esgoto entre em carga, a comunicação poderá ser realizada em um nível superior, correspondente às singularidades de esgoto no interior das edificações, podendo contribuir em ambos os sentidos através das caixas de inspeção ou ralos das casas.

Outras estruturas relevantes ao SES também serão representadas com o MODCEL-SHIM, como estações elevatórias, reservatórios etc. Para isso serão adaptadas as células de escoamentos pré-existentes para a representação do SES. O conjunto de ligações

existentes no MODCEL será também adaptado para as comunicações da rede de esgoto, e para simulação das comunicações entre camadas.

Nesse contexto, arranjos topológicos específicos, usando células e ligações hidráulicas pré-existentes no MODCEL, serão construídos para representar ligações irregulares de esgoto na drenagem, ligações parasitárias da drenagem nos esgotos, usos de infraestruturas verde-azul, com finalidade de armazenamento temporário, infiltração ou tratamento de água etc. A Tabela 3-1 mostra os arranjos identificados e disponibilizados para a modelagem integrada dos principais elementos dos sistemas, e de demais elementos superficiais atingidos. A referida tabela apresenta as funções que estes elementos possuem e os efeitos que sofrem e ocasionam sobre a infraestrutura urbana. São apresentados também potenciais soluções para cada um dos elementos a serem simulados.

Tabela 3-1. Arranjos disponibilizados para a modelagem integrada (MODCEL-SHIM) dos principais elementos do sistema superficial, de drenagem e de esgotamento. Fonte: Elaboração própria.

Sistema	Elemento	Funções e efeitos - Drenagem	Funções e efeitos - Esgotamento	Soluções previstas
Superficial	Ruas	Escoamento superficial. Para chuvas maiores pode se tornar o principal caminho dos escoamentos superficiais. Representadas por células no Modcel. A ligação entre ruas se dá pela solução das equações de Saint-Venant. A ligação das ruas e o sistema de drenagem (PVs) ocorre por bueiros ou bocas de lobo em ligações que resolvem as equações de orifício.	Quando alagadas (falha de microdrenagem) ou inundadas (falha de macrodrenagem) podem contribuir para o sistema de esgotamento pelos tampões dos poços de visita localizados nas ruas ou calçadas, ou em patamares maiores de lâminas de água, contribuir pelo sistema de esgotamento domiciliar (ralos etc.). As ligações entre ruas e PVs ou ralos é realizado por equações de orifício.	Pavimentos permeáveis. Aumento da capacidade de dispositivos de captação de águas pluviais superficiais (bocas de lobo e bueiros).
	Edificações	Podem contribuir para o sistema de microdrenagem (PVs de drenagem) ou para o sistema viário com aporte de águas pluviais de telhados e pátios. Podem contribuir, de maneira irregular, com águas residuais para o sistema de microdrenagem (PVs de esgoto). São representados por células no Modcel. A ligação entre as edificações e as redes ocorre por ligações em tubulações circulares resolvendo a eq. de Saint-Venant ou eq. de escoamento sob pressão. A ligação das edificações e a rua ocorre por equações de vertimento.	Contribuem para o sistema de esgotamento sanitário (PVs de esgoto) com águas residuais domiciliares. Podem contribuir, de maneira parasitária, com águas pluviais, oriundas de telhados e pátios, para o sistema de esgotamento (PVs de esgoto). Simulação de ligações em tubulações resolvendo a equação de Saint-Venant ou escoamento sob pressão.	Telhados verdes. Jardins de chuva. Reservatórios de lote. Tratamento individual de águas residuais.
	Espaços Livres	Locais de potencial acúmulo de águas pluviais. Dependendo da topografia, podem ser potenciais caminhos d'água. Representados por células no Modcel. A sua ligação com ruas ocorre por equações de vertimento.	Locais de potencial acúmulo de águas residuais após o seu extravasamento e direcionamento pelas ruas e cursos d'água.	Reservatórios de retenção, ou amortecimento. Parques fluviais. Reservatórios para armazenamento de águas contaminadas. Wetlands.

Sistema	Elemento	Funções e efeitos - Drenagem	Funções e efeitos - Esgotamento	Soluções previstas
Drenagem Urbana	Poços de visita de drenagem	Estrutura para acesso às redes de serviços de drenagem urbana. Recebe a contribuição das bocas de lobo e grelhas (ruas), ou contribuição das reder domiciliares de drenagem. São representadas por células no Modcel. As células de PVs são conectados entre si pela equação de Saint-Venant ou por equações de escoamento sob pressão. As células de PVs também se conectam à superfície por ligações de orifício que podem representar os bueiros e boca de lobo ou a saída pelo tampão dos PVs (alagamentos).	Podem receber contribuições irregulares de redes do sistema de esgotamento sanitário. As contribuições irregulares por meio de tubulações circulares são resolvidas pela equação de Saint-Venant ou por equações de escoamento sob pressão.	Redimensionamento (solução clássica).
	Galerias	Condutos pelos quais percorre o escoamento de águas pluviais. Dimensionados para funcionar a superfície livre e para tempos de retorno de 5 a 25 anos. Representado por ligações no Modcel que podem resolver equações de Saint-Venant (sem falha) ou equação de escoamento sob pressão (falha).	Podem receber de forma irregular contribuições de águas residuais. Podem contribuir de maneira parasitária para o sistema de esgotamento sanitário. Representado por ligações no Modcel que podem resolver equações de Saint-Venant ou equação de escoamento sob pressão.	Redimensionamento (solução clássica), ou redirecionamento das águas pluviais e/ou residuárias para sistemas de tratamento alternativos ou de reservação. Abertura de escoamentos para reincorporação dos cursos d'água à paisagem. Interceptores de águas residuais. Captações em tempo seco.
	Rios e canais	Cursos d'água associados ao sistema de macrodrenagem. Representados por células no Modcel. Receptores dos sistemas de microdrenagem (ligações por eq. de Saint-Venant ou eq. sob pressão). Sua falha está associada ao extravasamento da calha nos períodos de cheia fluvial. Ligações de vertimento com planícies marginais (ruas, edificações ou espaços livres). Ligações resolvendo a equação de Saint-Venant entre células de rio.	Principais passivos ambientais pela contribuição de águas residuais. Podem receber ligações irregulares diretas de tubulações do sistema de esgotamento sanitário (ligações por equações de Saint-Venant ou equações sob pressão).	Alternativas tradicionais (canalização, limpeza, dragagem, desvio, barragem etc.). Reservatórios on-line. Restauração fluvial. Interceptores de águas residuais. Captações em tempo seco.

Sistema	Elemento	Funções e efeitos - Drenagem	Funções e efeitos - Esgotamento	Soluções previstas
Esgotamento Sanitário	Poços de visita de esgotamento	Podem receber contribuições parasitárias de redes do sistema de drenagem urbana. As contribuições parasitárias, por meio de tubulações circulares, são resolvidas pela equação de Saint-Venant ou por equações de escoamento sob pressão. Podem receber águas pluviais pelo alagamento/inundação das ruas por meio das tampas dos PVs ou ralos, cuja ligação é realizada por equações de orifício. Podem contribuir para a rua pelo extravasamento do sistema de drenagem, resolvendo equações de orifício.	Estrutura para acesso às redes de serviços de esgotamento sanitário. Recebe a contribuição do sistema de esgotamento domiciliar. São representadas por células no Modcel. As células de PVs são conectados entre si pela eq. de Saint-Venant ou por eq. de escoamento sob pressão.	Estruturas de vertimento para falha controlada quando houver aporte excessivo de águas pluviais. Direcionamento das águas para reservação e/ou tratamento.
	Tubulações de esgoto	Podem receber contribuições parasitárias de redes do sistema de drenagem urbana. As contribuições parasitárias, por meio de tubulações circulares, são resolvidas pela equação de Saint-Venant ou por equações de escoamento sob pressão.	Condutos pelos quais percorre o escoamento de águas residuais. Dimensionados para funcionar a superfície livre. Representado por ligações no Modcel que podem resolver equações de Saint-Venant (sem falha) ou equação de escoamento sob pressão (falha).	
	Estações elevatórias	O aporte excessivo de águas pluviais poderá interromper estes equipamentos fundamentais para o correto direcionamento e tratamento das águas pluviais.	Equipamento necessários para realizar o acréscimo de carga a determinado trecho de rede de esgotamento com a função de vencer trecho em contra declive. Representado no Modcel por uma ligação de bombeamento na qual é fixada a vazão média de funcionamento.	
	Estação de tratamento		Equipamento com função de remover os poluentes das águas residuais, de maneira a aportar para os corpos hídricos efluentes com parâmetros adequados e em concordância com o padrão exigido pelos órgãos ambientais.	

Na Etapa 2 serão diretamente utilizados os resultados obtidos dos estudos hidrológicos da Etapa 1, os quais apresentam um evento ou mais eventos a serem simulados. Para falhas ocasionadas pelo excesso de escoamento superficial serão utilizadas chuvas intensas. Estas chuvas poderão corresponder a chuvas de projeto (ex.: tempo de retorno de 10 anos – típico de projeto para microdrenagem, de 25 anos – típico de projeto para a macrodrenagem, mas que já estressa a micro, de 50 ou 100 anos – tempos utilizados para verificação de falhas do sistema) ou corresponder a chuvas reais que apresentaram impactos significativos sobre os sistemas estudados. Por outro lado, caso seja necessário simular o efeito da qualidade da água a longo prazo, poderão ser desenvolvidos estudos de chuva que representem anos hidrológicos, para melhor interpretar o funcionamento do sistema de manejo de águas pluviais e o sistema de esgotamento sanitário, analisando possíveis influências sazonais e falhas recorrentes.

A Etapa 2 visa determinar os impactos quantitativos relativos aos fluxos de vazões entre os sistemas, apresentando respostas de níveis, velocidades e vazões entre células. A precisão dos resultados irá depender dos dados disponíveis para calibração do modelo hidrodinâmico. Sendo assim, será possível estimar nesta etapa:

- Impactos do mau funcionamento do sistema de drenagem ou decorrentes de sua inexistência;
- Impactos do mau funcionamento do sistema de esgotamento sanitário ou decorrentes de sua inexistência;
- Total de água pluvial que adentra o sistema de esgotamento sanitário, bem como os efeitos para a sobrecarga hidráulica;
- Locais onde ocorre a contribuição de águas pluviais para o sistema de esgotamento sanitário;
- Total de extravasamentos dos sistemas combinados (tipicamente chamados de CSO ou *Combined Sewer Overflows* na literatura);
- Locais onde ocorre CSO;
- Envoltória esperada do percentual de ligações clandestinas de águas residuais no sistema de drenagem;
- Envoltória esperada do percentual de ligações parasitas de águas pluviais no sistema de esgotamento sanitário.

3.3 ETAPA 3 - Desenvolvimento do Modelagem de Qualidade Ambiental

Esta etapa diz respeito ao desenvolvimento de Modelagem de Qualidade Ambiental Simplificada mediante elaboração de planilha eletrônica paralela aos cálculos hidrodinâmicos para avaliação da qualidade ambiental dos sistemas de drenagem e corpos receptores, em rotina de pós-processamento, diante de contribuições do sistema de esgotamento sanitário sobre a rede de drenagem, e vice-versa, além de sua interação com a camada superficial do escoamento.

No âmbito do presente trabalho serão abordadas as células de escoamento dos sistemas superficiais, de microdrenagem e de esgotamento sanitário como volumes de controle em que ocorrem os processos físicos relevantes para os estudos de qualidade de água. As células de escoamento serão tratadas como reatores biológicos e para esta etapa será considerado o modelo de mistura completa cuja aplicação nas referidas células se assemelha ao modelo de reatores de mistura completa em série. Segundo Von Sperling (2014, v. 7 p. 203) estes tipos de modelo

> [...] são usados para modelar o regime hidráulico que existe entre os regimes ideais de fluxo em pistão e mistura completa. Se a série for composta de uma unidade apenas, o sistema reproduz um reator de mistura completa. Se o sistema apresentar um número infinito de reatores em série, o fluxo em pistão é reproduzido. O fluxo de entrada e saída é contínuo. A representação hidráulica de reatores de mistura completa em série é frequentemente utilizada para rios.

Porém, dada a lógica de interpretação do território em células de escoamento e os fluxos possíveis em várias direções, além da possibilidade de interação vertical entre camadas é necessário adaptar a metodologia de mistura completa em série para mistura completa em redes. A Figura 3-6 apresenta de maneira esquemática a consideração realizada para o desenvolvimento da presente metodologia. Futuramente podem ser implantados modelos de fluxo em pistão ou fluxo disperso pra topologias de fluxo de água com relação comprimento largura mais alta.

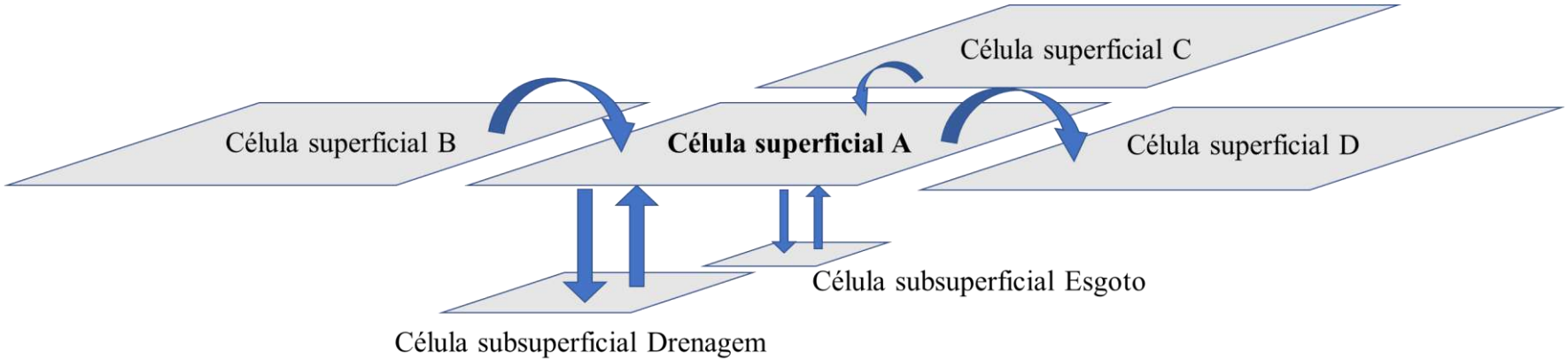

Figura 3-6. Arranjo esquemático das células de escoamento para a consideração de reatores de mistura completa em redes. Fonte: Elaboração própria.

Matematicamente a determinação da concentração de um contaminante entre intervalos de tempos para uma determinada célula de escoamento poderá seguir a Equação 3-1, desenvolvida a partir do balanço de massa.

$$Q_S^M . C_{t+1} = \frac{dVC_0}{dt} + \sum Q_E^N . C_t^N + r_p V - r_c V \qquad \text{Equação 3-1}$$

Na qual:

Q_S^M = Vazões para o número M de ligações de saída da célula analisada (L^3T^{-1});
C_{t+1} = Concentração de saída após a mistura completa na célula analisada (ML^{-3});
C_0 = Concentração do volume acumulado na célula no início do processo de mistura (ML^{-3});
V = Volume de água na célula de escoamento no intervalo de tempo *t* (L^3);
t = Intervalo de tempo da simulação (T);
Q_E^N = Vazões para o número N ligações de entrada da célula analisada (L^3T^{-1});
C_t = Concentrações do composto para cada uma das N ligações de entrada na célula (ML^{-3});
r_p = taxa da reação de produção do composto ($ML^{-3}T^{-1}$);
r_c = ~taxa da reação de consumo do composto ($ML^{-3}T^{-1}$).

Dessa maneira, a vazão afluente de determinada célula de escoamento possuirá a concentração calculada no final do intervalo de tempo em questão, e servirá como dado de entrada paras as células adjacentes no próximo intervalo de tempo.

Inicialmente, as planilhas eletrônicas a serem desenvolvidas para o estudo da qualidade de água representarão os parâmetros de DBO. A DBO permite estimar, indiretamente, a quantidade de matéria orgânica nas diversas superfícies de acúmulo, sejam cursos d'água, redes de drenagem ou de esgoto e até ruas e lotes. Dessa maneira, a determinação de DBO é também um indicativo do consumo de OD. Além disso, em locais onde há maior acúmulo de DBO há também maior probabilidade da existência de patogênicos, responsáveis por doenças de veiculação hídrica. Sendo assim, A DBO, junto com a DQO, são parâmetros relevantes para a determinação do grau de poluição dos corpos d'água (Von Sperling, 2014).

Esta metodologia poderá ser replicada para outros parâmetros qualificadores da água, como a concentração de contaminantes – a exemplo do oxigênio dissolvido, coliformes, hidrocarbonetos, agrotóxicos e componentes dos ciclos do nitrogênio e do fósforo. As planilhas eletrônicas funcionarão paralelamente ao modelo hidrodinâmico (MODCEL-SHIM), associado à circulação hidrodinâmica, que apresenta os dados de entrada fundamentais para as equações de qualidade.

Para a metodologia exposta na presente tese, e desenvolvida inicialmente para a concentração de DBO, será utilizada a equação de Streeter-Phelps para representação do consumo de DBO no tempo, apresentada na Equação 3-2.

$$L = L_0 e^{-k_1 t} \qquad \text{Equação 3-2}$$

Na qual: L representa a concentração de DBO remanescente (mg/L); L_0 é a concentração no ponto inicial de DBO, ou no ponto de lançamento do efluente, (mg/L); k_1 é o coeficiente de desoxigenação (dia^{-1}); e t é o intervalo de tempo.

A utilização do MODCEL-SHIM e da Modelagem de Qualidade Ambiental Simplificada possibilitará a obtenção de um diagnóstico detalhado dos principais problemas em relação às interações parasitárias e clandestinas entre os sistemas de drenagem e esgoto no que diz respeito à quantidade e à qualidade da água. Os resultados de níveis, lâminas, volumes, velocidades e vazões da Etapa 2 serão utilizados como dados de entrada para a Etapa 3, quando o problema assim o demandar.

Nesta etapa será possível estimar:

- Concentração de contaminantes nas camadas superficiais;
- Concentração de contaminantes em pontos chave do sistema de drenagem urbana;
- Concentração de contaminantes nos corpos hídricos receptores;
- Concentração de contaminantes afluentes aos sistemas de tratamento de esgoto sanitário.

3.4 ETAPA 4 - Proposições de soluções para os sistemas disfuncionais

O Modcel apresenta potencial de representar soluções tanto para o sistema de drenagem como para o sistema de esgotamento sanitário, assim como intervenções superficiais, associadas à paisagem urbana. Nesta etapa, poderá ser utilizado tanto o MODCEL-SHIM, como sua simulação conjunta com a Modelagem de Qualidade Ambiental Simplificada para verificação de cenários de prognóstico, em comparação ao diagnóstico apresentado. Desta forma, a Etapa 4 poderá ser aplicada a partir da Etapa 2 ou a partir do desenvolvimento das Etapas 2 e 3.

A ferramenta será capaz de simular obras de infraestrutura tradicional, mas também permite que sejam abordadas proposições com caráter multifuncional. A exemplo dessas proposições temos soluções baseadas na natureza e de infraestrutura verde e azul, que tenham capacidade de mitigar inundações e alagamentos, melhorar a qualidade ambiental do sistema de drenagem urbana, auxiliar no tratamento do sistema de esgotamento sanitário e que agreguem valor à área urbana, desdobrando em melhores características ambientais e valorização imobiliária.

O potencial de simulação integrada do MODCEL-SHIM será explorado. Ações no território que tenham impacto sobre as redes, serão priorizadas. Miguez (2001) destaca que o modelo em células de escoamento possui como principal inovação a utilização de espaços do território para locar o volume das águas urbanas, e procurar, fora das redes tradicionais, soluções para mitigação dos volumes de cheia, descarregando as galerias. Esta lógica pode ser estendida para o sistema de esgotamento sanitário, no qual, ações no território poderão auxiliar nos problemas de funcionamento da rede. Como exemplo destas ações destacam-se reservatórios de acumulação de esgoto ou água mesclada com drenagem para posterior tratamento, bem como a implementação de *wetlands* construídos para substituição do sistema de tratamento tradicional.

Duas principais linhas de solução foram entendidas no processo de construção da presente tese. A primeira parte da concepção de solução integrada para sistemas disfuncionais de drenagem recebendo águas de esgoto, e a segunda da concepção de solução integrada para sistemas disfuncionais de esgoto recebendo águas de drenagem.

3.4.1 Concepção de solução integrada para sistemas disfuncionais de drenagem recebendo águas de esgoto

Tendo em vista a necessidade reconhecida de trabalhar em diversas frentes, as alternativas apresentadas pelo presente trabalho deverão possuir caráter multifuncional para os sistemas de drenagem e esgoto. A operação do sistema composto, com simulações integradas de drenagem e esgotamento sanitário, pode assumir 3 dinâmicas de operação no caso de sistemas disfuncionais de drenagem recebendo esgotos.

A primeira dinâmica corresponde a períodos em tempo seco (períodos sem chuvas), no qual o aporte aos sistemas propostos será apenas de ligações irregulares do sistema de esgoto no sistema de drenagem. Esta água contaminada, sem o aporte de águas pluviais, será direcionada para tratamento convencional. Para isto, serão utilizadas estruturas de captação de tempo seco (CTS). Independente da escala da CTS a ser executada, as estruturas hidráulicas terão como principal funcionalidade em tempo seco a interceptação dos fluxos contaminados, os chamados "escoamentos em tempo seco", e transferi-los para o sistema de esgoto sanitário ou, eventualmente, diretamente para uma Estação de Tratamento de Esgoto-ETE, e evitar seu lançamento ou presença em corpos hídricos superficiais.

Adicionalmente, em tempo chuvoso, estas estruturas deverão garantir o extravasamento dos fluxos resultantes da mistura entre os escoamentos de tempo seco e escoamentos superficiais pluviais para um sistema de tratamento com soluções baseadas na natureza (*wetlands* ou jardins filtrantes, por exemplo) ou para um reservatório de detenção, a depender das vazões de escoamento. Esta configuração deve impedir a entrada hidráulica de esgoto diluído no sistema de esgoto convencional ou diretamente em uma ETE. A contribuição destes extravasamentos ao sistema de tratamento de águas urbanas caracterizará a segunda e a terceira dinâmica de operação.

A segunda dinâmica de operação corresponde às chuvas ordinárias (ou tempo recorrente) que se caracterizam por estressar as captações em tempo seco, ocasionando extravasamentos gerados pela contribuição pluvial; porém, não apresentam capacidade de depuração dos esgotos que contribuem ao sistema de drenagem, mantendo os fluxos do sistema em condições ambientais não adequadas. Dessa forma, o primeiro dispositivo de tratamento desta dinâmica receberá as águas excedentes contaminadas. Para viabilizar

este tratamento, poderão ser utilizadas macrófitas aquáticas devido à sua capacidade de adaptação a diversos tipos de ambientes e capacidade de remoção de fósforo e nitrogênio, no caso da adoção de *wetlands*. Além disso, pela dinâmica do sistema, é esperada uma eficiência considerável em relação à remoção de sólidos suspensos e DBO.

Conforme apresentado na etapa de revisão bibliográfica, a primeira e a segunda dinâmica poderão possuir o mesmo sistema de tratamento em substituição ao tratamento convencional dos esgotos sanitários. A utilização de *wetlands* construídos para tratamento de efluentes *in natura* tem sido amplamente estudado (Lana et al., 2013; Souza, 2021; Shinohara, 2021; Rodrigues, 2021).

A terceira dinâmica diz respeito ao comportamento do sistema sob eventos de chuvas intensas. Espera-se que, nesta configuração, o elevado volume de águas pluviais possa depurar os contaminantes originados nas contribuições irregulares a níveis de qualidade ambientalmente aceitáveis. O volume de escoamentos superficiais, porém, pode ser maior que o volume do sistema de tratamento e, dessa maneira, deverá ser dimensionado um reservatório-pulmão que permita o acúmulo destas águas em condições extremas. O reservatório-pulmão ainda será dimensionado prevendo a dificuldade de descarga no corpo receptor, pela elevação do nível de jusante. Esta última configuração visa avaliar uma solução adequada a sistemas urbanos assentados em planícies de grandes rios ou em áreas costeiras.

A simulação destes reservatórios ou dos *wetlands* construídos é realizada na camada superficial do escoamento para o qual contribuem as redes dos sistemas de drenagem ou de esgotamento, a depender da solução escolhida.

Ainda, poderão utilizados o método de Simulação Hidrodinâmica Multicamadas e o Módulo de Qualidade de Água desenvolvidos para simulação de cenários de solução integrada dos sistemas de águas urbanas.

A eficiência no tratamento destas soluções poderá ser estimada aplicando os percentuais de redução de contaminantes levantados na etapa de revisão bibliográfica.

3.4.2 Concepção de solução integrada para sistemas disfuncionais de esgoto recebendo águas de drenagem

As ligações parasitárias de águas pluviais no sistema de esgotamento sanitário contribuem em período de chuvas com vazões significativas para redes de águas residuais. O sistema de esgotamento sanitário, por mais que seja dimensionado para receber parte de águas pluviais, não está preparado para a real contribuição dessas águas. Esta é uma característica do sistema misto, que ocorre na prática em grande parte dos centros urbanos brasileiros. Além de ocorrer de maneira parasitária pela contribuição da drenagem pluvial domiciliar, estas conexões entre os sistemas também podem ocorrer pela contribuição oriunda de alagamentos ou inundações que se conectam ao sistema de esgotamento pelos poços de visita e ralos dos domicílios.

As soluções integradas para sistemas mistos com contribuições parasitárias – levando em conta a dificuldade prática de interromper completamente as contribuições parasitárias e alagamentos/inundações urbanas – parte da necessidade de dimensionar estruturas de vertimento em pontos críticos do sistema de esgotamento sanitário.

As estruturas de vertimento poderão ser implementadas no modelo com a consideração de novas ligações hidráulicas que comunicam diretamente a camada subsuperficial de esgoto, com a camada subsuperficial de drenagem, não realizando a passagem dos escoamentos pela camada superficial diretamente. Estas novas conexões poderão ser representadas pelas equações de vertimento (V), de orifício (O1), ou de tubulação circular (G2) a depender da melhor representação da hidrodinâmica envolvida no processo real.

Estas regiões críticas sob o ponto de vista de extravasamentos deverão ser mapeadas na etapa de diagnóstico. O sistema de esgotamento com excesso de contribuições parasitárias, além de sobrecarregar o sistema e causar problemas estruturais a redes não projetadas para funcionar sob pressão, ocasiona a contaminação do meio natural e urbano. Dessa forma, as estruturas de vertimento a serem propostas deverão ser acompanhadas, quando possível, de sistemas de reservação e subsequente encaminhamento ao sistema tradicional de tratamento ou a um novo sistema local de tratamento baseado nos conceitos sustentáveis apresentados anteriormente.

4 AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DA METODOLOGIA

O presente capítulo traz dois exemplos de aplicação da metodologia proposta. O primeiro exemplo se trata de uma aplicação geral da metodologia, na qual, utilizando como laboratório de teste a bacia hidrográfica dos Rios Piraquê-Cabuçu são exploradas diversas possibilidades de aplicação da metodologia. Vale destacar que diversos problemas da interação entre os dois sistemas, encontrados no cenário prático da engenharia, poderão ser entendidos e diagnosticado a partir da implementação desta etapa da metodologia.

4.1 ETAPA 1 – Análise preliminar da Bacia Hidrográfica Piloto

A bacia do Rio Piraquê-Cabuçu está situada na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro. O seu curso principal de drenagem nasce na serra do Lameirão, no bairro de Campo Grande, onde é inicialmente chamado de Rio Gatos. O curso d'água se desenvolve em direção ao morro Cabuçu e a partir deste ponto ele passa a ter o mesmo nome do morro. Em seu trecho final, após a confluência com o Rio dos Porcos, o curso d'água passa a se chamar Rio Piraquê e percorre mais 3,7 km até desaguar na Baía de Sepetiba.

Além de Campo Grande a bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu abrange os bairros de Guaratiba, Pedra de Guaratiba, Santíssimo, Senador Camará e Senador Vasconcelos.

A bacia ainda está inserida na quinta Área de Planejamento (AP 5) do município do Rio de Janeiro. Esta área se caracteriza por apresentar crescimento populacional acelerado e sem adequada proteção ao meio ambiente, além de apresentar ausência de serviços de infraestrutura básica, principalmente no que diz respeito aos setores do saneamento. O Plano Diretor da Cidade (Rio de Janeiro, 2012) prevê assistência ao crescimento populacional com investimentos públicos em infraestrutura, acompanhamento da instalação de complexos industriais e estímulo à atividade agrícola e proteção ao meio ambiente.

Complementarmente, vale destacar que está área de planejamento é dividida em quatro regiões de planejamento: RP 5.1 Bangu; RP 5.2 Campo Grande, RP 5.3 Santa Cruz e RP 5.4 Guaratiba. A bacia do Rio Piraquê-Cabuçu engloba grande parte da RP 5.4 Guaratiba, uma região considerável da RP 5.2 Campo Grande e uma pequena área a montante da RP 5.1 Bangu.

O mapa apresentado na Figura 4-1 apresenta a localização da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu em relação às áreas e regiões de planejamento do município do Rio de Janeiro.

Segundo o Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais (PDMAP) do município do Rio de Janeiro (2012), a bacia hidrográfica em questão drena uma área de aproximadamente 110 km², e seu talvegue principal se estende por cerca de 23 km.

Como principais afluentes do Rio Piraquê-Cabuçu podem-se destacar o Rio Cabuçu Mirim, o Rio Prata do Cabuçu, o Rio Cantagalo, o Rio Chacrinha, o Rio Consulado, o Rio dos Porcos e o Valão das Cinzas. O PDMAP (2012) apresenta as áreas das sub-bacias hidrográficas e extensão dos principais cursos d'água citados. Estas informações podem ser observadas na Tabela 4-1, apresentada a seguir. Os principais cursos d'água da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu são apresentados no mapa da Figura 4-2.

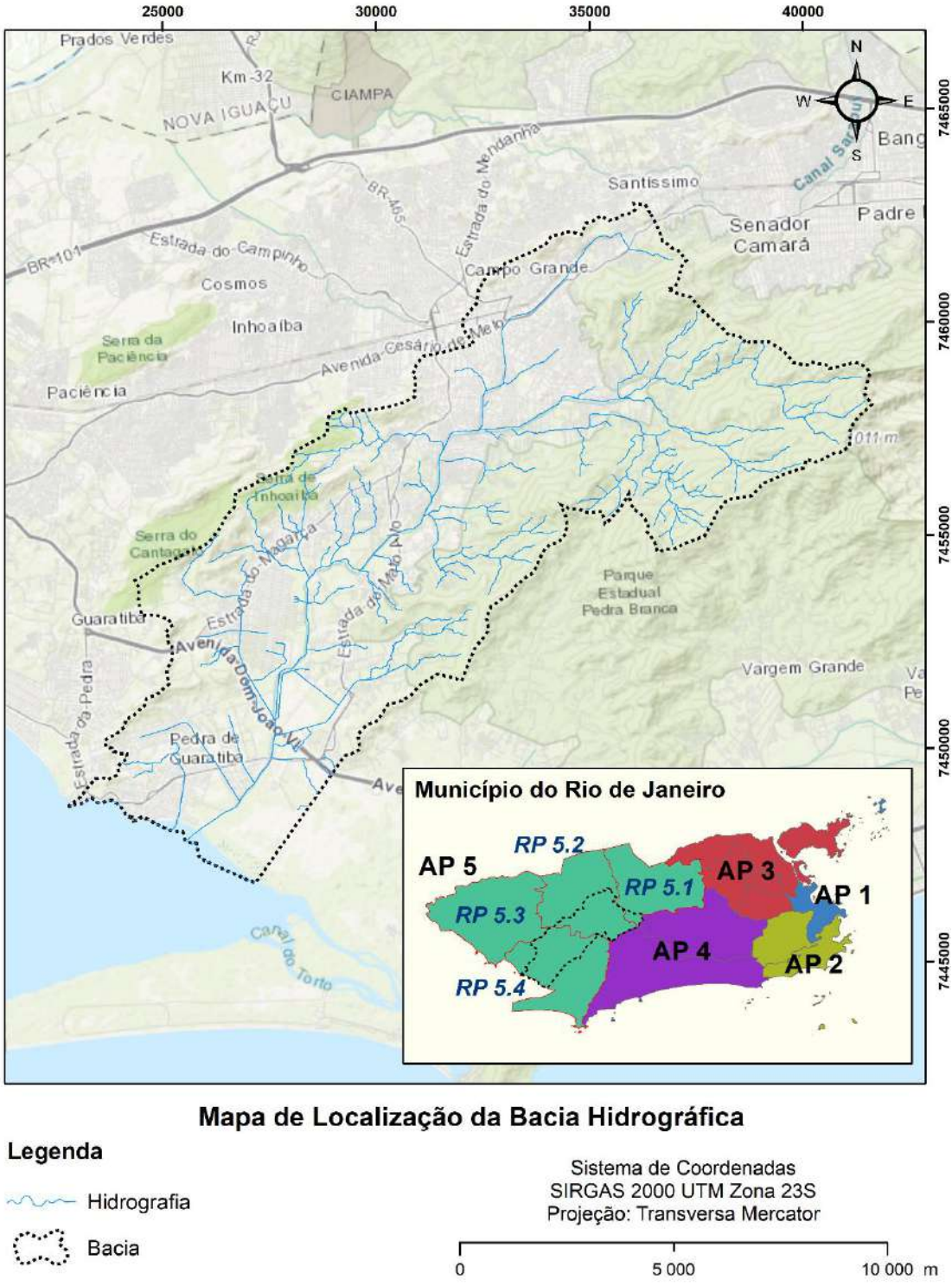

Figura 4-1. Localização da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, Áreas de Planejamento do Município do Rio de Janeiro e Regiões de Planejamento da AP5. Fonte: Elaboração em conjunto com o projeto de extensão na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu da UFRJ.

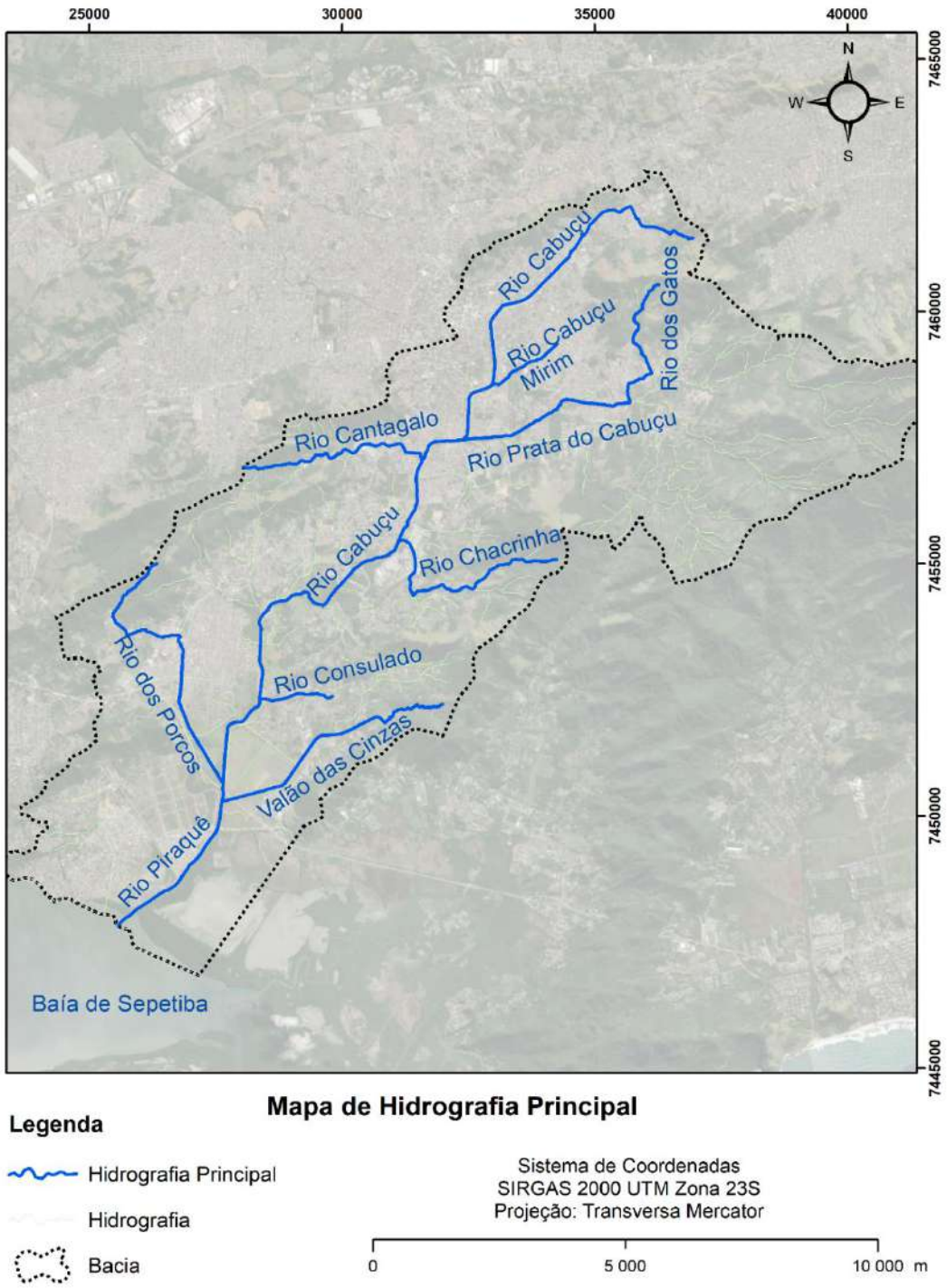

Figura 4-2. Mapa da Hidrografia Principal na Bacia Hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu. Fonte: Elaboração em conjunto com o projeto de extensão na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu da UFRJ.

Tabela 4-1. Informações dos principais cursos d'água na bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu. Fonte: Rio de Janeiro, 2012.

Curso d'água	Área da sub-bacia (km²)	Extensão do talvegue principal (km)
Rio Cabuçu, a montante da confluência com o Rio Cabuçu Mirim	9,8	6,83
Rio Cabuçu Mirim	2,3	3,08
Rio Prata do Cabuçu	30,5	12,12
Rio Cantagalo	4,1	4,39
Rio da Chacrinha	5,6	4,82
Rio Consulado	1,9	1,95
Rio dos Porcos	1,9	5,64
Valão das Cinzas	8,3	6,73
Rio Piraquê-Cabuçu	8,6	21,83

Em relação aos setores do saneamento é possível perceber que há na bacia um desequilíbrio de infraestruturas básicas. Estes impactam e são impactados pelo sistema de manejo de águas pluviais e drenagem urbana.

A bacia se destaca por possuir 95% dos seus domicílios abastecidos por rede geral de água e 99% com lixo coletado, enquanto apenas 71% dos domicílios possuem o esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial (IBGE, 2010), havendo indícios que grande parte destes esgotos é lançado no sistema de drenagem.

Isto é evidenciado quando analisada a qualidade ambiental do curso principal da bacia, uma vez que o rio Piraquê-Cabuçu foi enquadrado como de qualidade ruim ou péssima (ANA, 2011). É possível observar que ocupações marginais ao curso principal da bacia lançam esgoto in natura diretamente ao rio. Como apresentado nos boletins de qualidade das águas (INEA, 2019; 2020) o rio Piraquê-Cabuçu apresentou enquadramento ruim ou muito ruim pelo Índice de Qualidade das Água (IQA), no decorrer de todos os meses de coleta e análise de água. Além disso, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA) classificou as águas do rio como impróprias para tratamento convencional visando abastecimento público.

A Figura 4-3 apresenta, por setor censitário, a distribuição espacial do percentual de domicílios na bacia que realizam o esgotamento via rede geral de esgoto ou pluvial. É possível observar que a região mais a jusante da bacia é a mais atingida pela falta de rede para conduzir os esgotos domésticos.

Além dos 71% dos domicílios cujos esgotos são coletados via rede geral de esgoto ou rede pluvial, 12,3% fazem uso de fossa séptica, 3,7% utilizam fossa rudimentar, 8,6% dos esgotos são afastados via vala, 3,6% são lançados nos rios ou mar e 0,8% de outras formas (IBGE, 2010).

Complementarmente, segundo o IBGE (2010), é possível observar esgoto correndo a céu aberto no entorno dos domicílios em cerca de 8% dos casos de toda a bacia. A Figura 4-4 apresenta o mapa com estes resultados, onde é possível observar os setores censitários que apresentam esgoto a céu aberto na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu. Observa-se que há maior concentração de casos de esgoto a céu aberto na região mais a jusante da bacia, porém, também se nota esse problema distribuído em outras regiões.

No que diz respeito ao setor de manejo de águas pluviais e drenagem urbana é possível realizar um diagnóstico simplificado do sistema de microdrenagem da região a partir dos dados apresentados pelo IBGE (2010). Na descrição do entorno dos domicílios há um indicador do censo que trata a respeito da existência de bueiro ou boca de lobo, o que é uma sinalização da presença de redes de microdrenagem. Segundo estas informações levantadas, a bacia possui 62,3% de domicílios com bueiro ou boca de lobo em seu entorno.

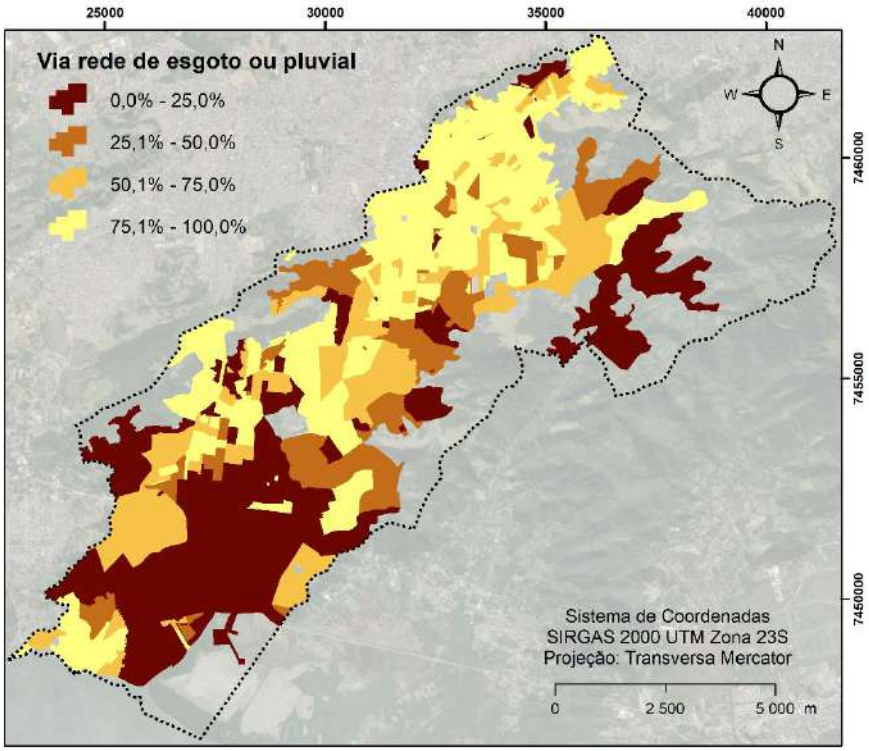

Figura 4-3. Mapa de abrangência de rede para esgotamento sanitário na bacia, por porcentagem de domicílios atendidos por rede de esgoto ou rede de drenagem. Fonte: IBGE (2010).

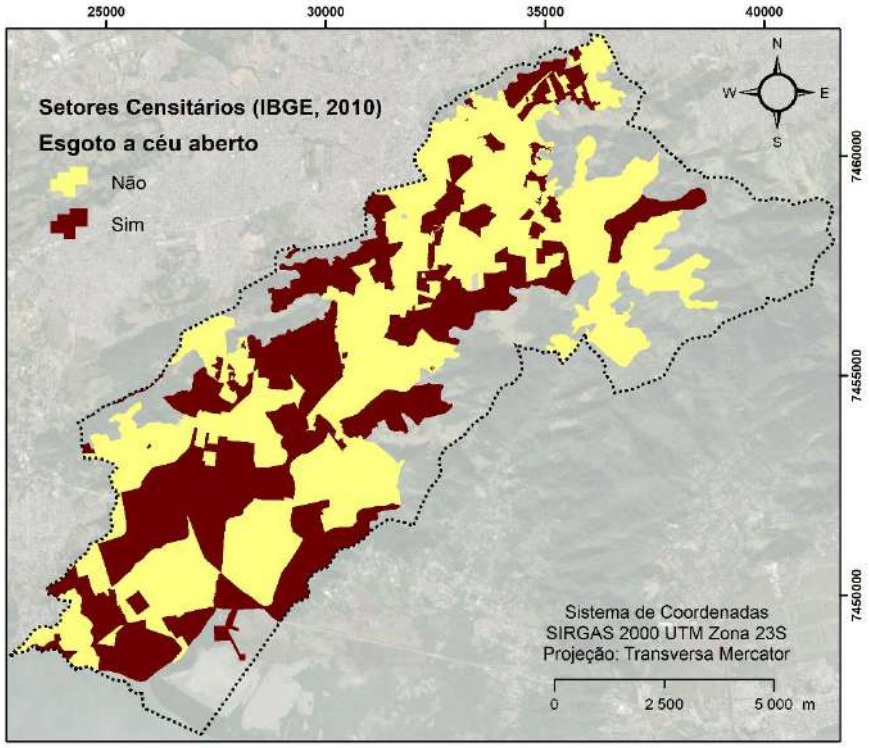

Figura 4-4. Mapa de regiões com esgoto a céu aberto na bacia. Fonte: IBGE (2010).

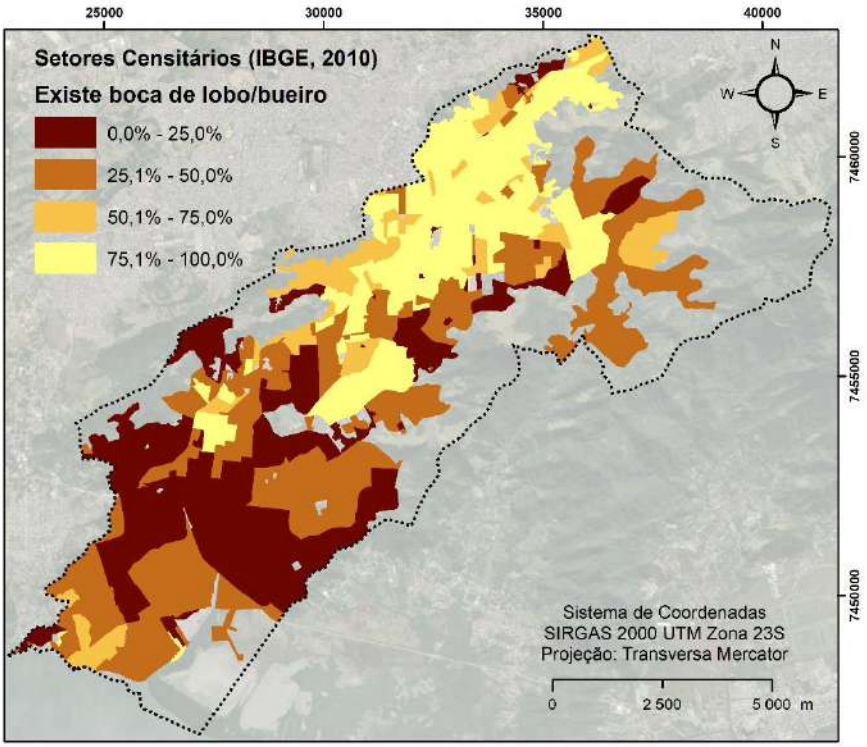

Figura 4-5. Mapa do percentual de domicílios da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu que possuem de boca de lobo ou bueiro no seu entorno. Fonte: IBGE (2010).

Em relação ao sistema de macrodrenagem vale destacar a classificação da bacia hidrográfica apresentada pelo PDMAP (RIO DE JANEIRO, 2012), que divide a bacia partir de três regiões principais: Piraquê-Cabuçu Superior, Médio Piraquê-Cabuçu e Piraquê-Cabuçu Inferior.

O Piraquê-Cabuçu Superior abrange as cabeceiras dos Rios Cabuçu, Cabuçu Mirim e Prata do Cabuçu. Esta área se caracteriza por uma urbanização consolidada, com construções regulares e vias nas margens dos rios. Os cursos d'água desta região, em sua maioria, são canalizados em concreto, o que favorece o aumento da velocidade de escoamento das águas desses rios e pode causar prejuízos a jusante. A área mais preservada de ocupação antropológica está na cabeceira do Rio da Prata do Cabuçu.

O Médio Piraquê-Cabuçu abrange as sub-bacias dos Rios Cantagalo, Chacrinha, Consulado e dos Porcos. Esta região se caracteriza por estar em expansão, além de já apresentar ocupação irregular, que, sobretudo, ocasiona a retirada cobertura vegetal nativa. O escoamento do curso d'água nesta região ocorre em sua maioria em seção natural com presença de vegetação ciliar em suas margens. É nesta região que está

inserido o bairro Jardim Maravilha, loteamento de áreas invadidas que sofre com os extravasamentos dos cursos d'água.

O Piraquê-Cabuçu Inferior engloba as sub-bacias do Rio Valão das Cinzas e do Canal do Jardim Garrido. Os cursos d'água aqui se caracterizam por ter seção natural remanescente com declividade baixas. Sua margem esquerda possui vegetação de mangue mais preservada e sua margem direita apresenta áreas invadidas, que acabam sofrendo com extravasamentos recorrentes.

De forma geral o sistema de macrodrenagem da bacia apresenta subdimensionamento de determinados trechos fluviais e ocupação urbana de margens que no período de cheias expõe a população ali alocada aos extravasamentos dos cursos d'água.

Destacam-se 4 eventos de chuvas intensas que ocasionaram inundações na bacia, os eventos de: abril de 2010; fevereiro de 2018; abril de 2019; e março de 2020.

No evento de 2010 foram registrados, segundo o sistema Alerta Rio, cerca de 140mm de chuva em Campo Grande e 110mm de chuva em Guaratiba no decorre de 24h entre os dias 5 e 6. As estações de Campo Grande e de Guaratiba são as mais próximas da região de interesse e caracterizam de maneira adequada o regime pluviométrico da área de estudo. Em relação ao pico horário foram registrados de 34,8mm em Campo Grande e 17,4mm em Guaratiba.

Um mapa das manchas de inundação resultantes deste evento foi publicado no PDMAP (2012). Ele apresenta a mancha de inundação máxima para o evento, bem como a mancha de inundação periódica encontrada na região mais susceptível às inundações na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu. O mapa citado pode ser apresentado na Figura 4-6. Nele é possível observar diversas regiões alagadas principalmente no loteamento Jardim Maravilha e proximidades. Há uma série de outros registros de inundação, mas é possível destacar ainda as inundações na margem direita do Rio Piraquê, a jusante da bacia, e as inundações dos bairros Senador Vasconcelos e Campo Grande.

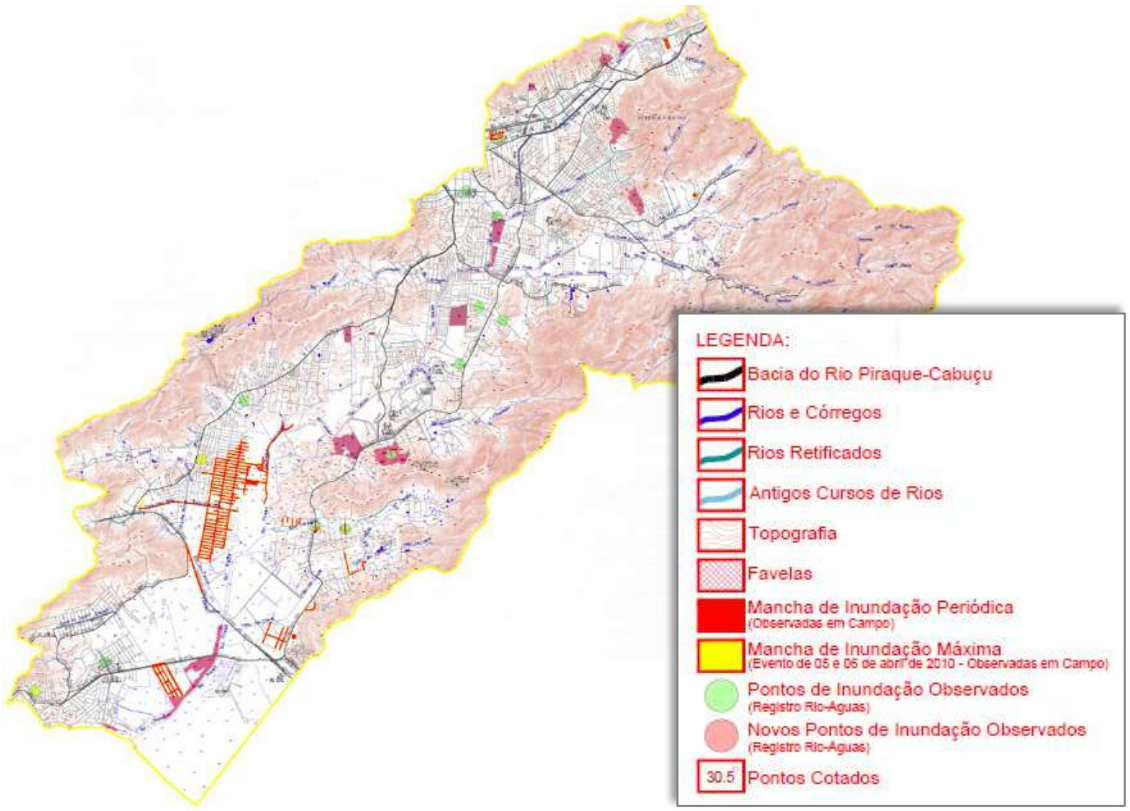

Figura 4-6. Diagnóstico das inundações na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu Fonte: PDMAP (2012)

O evento de 2018 apresentou maior intensidade horária que o evento de 2010. Segundo o sistema Alerta Rio no evento do dia 15/02/2018, foram registradas chuvas de 151,2mm em 24h em Guaratiba e de até 68,6mm em 24h na estação de Campo Grande. Em relação a precipitação máxima em 1h foram registrados em Guaratiba 53,0mm e em Campo Grande 57,2mm.

O evento deste ano ocasionou o extravasamento do curso principal da bacia, afetando principalmente o loteamento Jardim Maravilha e a localidade de Jardim Magarça, em Guaratiba. Ao todo, 4 vidas foram perdidas, além de diversos prejuízos ocasionados pelo aporte das inundações nos domicílios da região.

O evento de 2019 foi um dos mais críticos já registrados na região. O Alerta Rio registrou entre os dias 08 e 09 de abril 110,8mm em 24h em Guaratiba e 171,4mm em 24h em Campo Grande. O sistema também registrou o pico de 19,8 mm na estação de Guaratiba e 70,8 mm em Campo Grande, no que diz respeito às medições horárias.

Esta foi a chuva mais intensa observada desde o começo das medições nas duas estações pluviométricas. Para este evento foi observada a manutenção das inundações por até 8 dias em Jardim Maravilha.

Finalmente, para o evento de 2020 no dia primeiro de março o Alerta Rio registrou 110,6mm em 24h na estação de Campo Grande e chuvas de 131mm em 24h na estação de Guaratiba. Além disso, os máximos horários registrados em Campo Grande foram de 22,8mm e em Guaratiba de 21,4mm.

Para este evento, segundo registros, a região de Jardim Maravilha foi novamente afetada pelos extravasamentos do curso principal da bacia. As inundações geradas por esta cheia geraram cerca de 15cm dentro dos domicílios, além de afetar fortemente a mobilidade urbana. O bairro de Campo Grande também apresentou registros de inundações. Destaca-se para este evento a forte correlação entre o sistema de drenagem urbana e o sistema de esgotamento sanitário, uma vez que foram identificadas diversas áreas onde as redes de esgoto extravasaram, o que caracteriza conexões clandestinas entre ambos os sistemas.

Complementarmente ao registro de inundações apresentado, vale a pena destacar o trabalho executado pela empresa AquaFluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos (2020). O estudo realizado concentrou seus resultados no comportamento do sistema de macrodrenagem na região a jusante da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu para as chuvas com tempo de recorrência de 25 e 50 anos e duração de 6h (tempo de concentração estimado da bacia). O mapa da Figura 4-7 apresenta os resultados do estudo. Neste mapa é possível observar extravasamentos e inundações consideráveis na região do Jardim Maravilha, com lâminas superiores a 1m. Além disso, há regiões mais a jusante do Jardim Maravilha que ainda apresentam lâminas superiores a 75cm.

As regiões inundadas citadas apresentam elevada concentração populacional, prioritariamente de baixa renda, o que demonstra a urgência em resolver os problemas no sistema de macrodrenagem mitigando e controlando inundações.

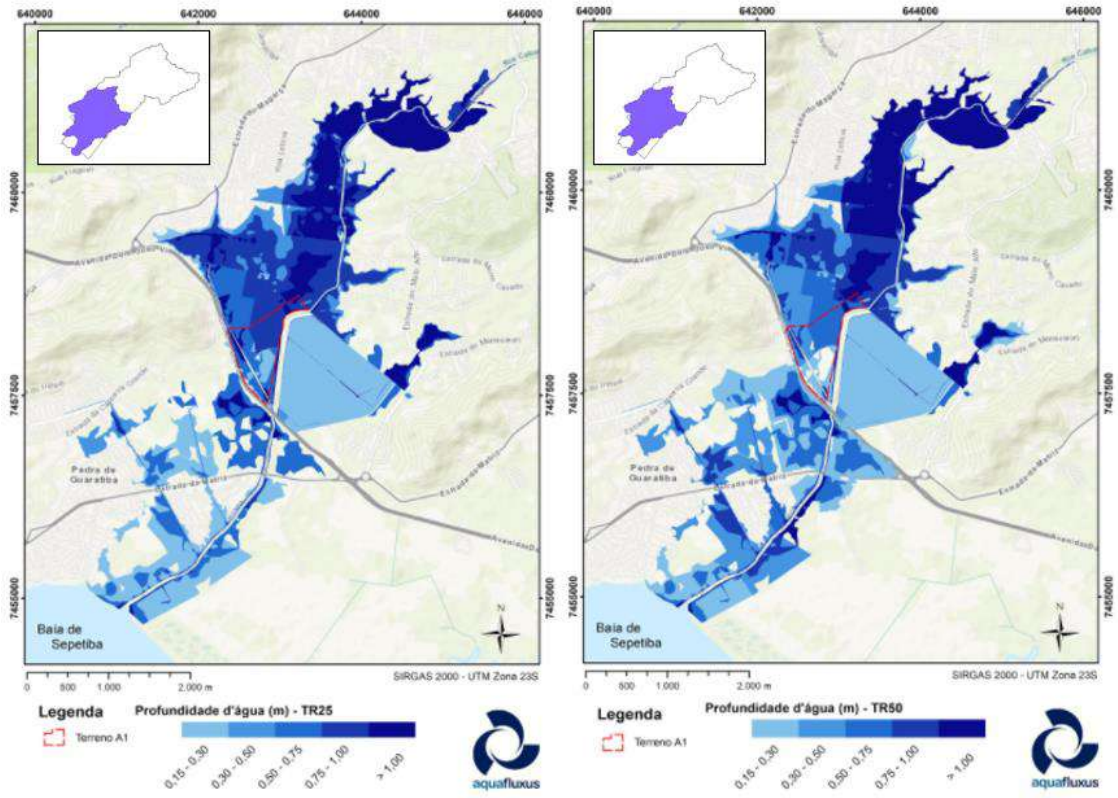

Figura 4-7. Mancha de inundação na região a jusante da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu para os tempos de retorno de 25 e 50 anos Fonte: AquaFluxus (2020)

Como pode ser identificado com as informações apresentadas, a bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu apresenta diversos problemas em relação aos sistemas foco de interesse do presente trabalho. Há nesta bacia diversas oportunidades de aplicar todas as etapas da metodologia proposta.

Será utilizada como caso de estudo exploratório do trabalho uma sub-bacia urbana piloto, afluente ao Rio da Prata Cabuçu, na qual se pretende desenvolver a metodologia e encontrar suas aplicações e fragilidades.

4.1.1 Apresentação da bacia piloto

A sub-bacia escolhida para aplicação da metodologia desenvolvida no âmbito do presente trabalho se localiza no trecho superior da bacia do Piraquê-Cabuçu. A região escolhida se caracteriza por apresentar uma ocupação urbana consolidada no bairro de Campo Grande, mas espaços livres de edificações remanescentes, nos quais ainda é possível prever soluções para os sistemas de drenagem e esgotamento sanitário, baseadas na natureza, sem a necessidade de realizar reassentamentos. Segundo Fonseca e França (2012) para o bairro de Campo Grande,

> A localização privilegiada devido às paisagens naturais, infraestrutura, áreas livres e uma economia dinâmica garantida pelo Distrito Industrial e subcentro, contribuíram para o desenvolvimento local. Contraditoriamente, produziram também desigualdades socioespaciais e problemas de infraestrutura. (FONSECA, 2012, p. 1).

A Figura 4-8 apresenta a localização da área de interesse na bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, enquanto a Figura 4-9 apresenta a delimitação da sub-bacia hidrográfica, foco do presente estudo, que possui aproximadamente 0,50 km² de área, integralmente no bairro de Campo Grande.

Um mapa com os principais elementos urbanos dentro da sub-bacia de interesse pode ser visto na Figura 4-10.

Há na bacia hidrográfica casos mais críticos no que diz respeito às inundações do sistema de macrodrenagem, porém, uma vez que o presente trabalho se propõe a simular de maneira integrada os sistemas de microdrenagem e esgotamento sanitário, a escolha por locais altamente degradados por um sistema de macrodrenagem falho e um processo de urbanização que não levou em conta o espaço do rio fogem do escopo inicial. Porém, a análise dos cursos d'água nas proximidades da área definida será levada em conta de maneira a representar mais fielmente os desafios encontrados para o sistema representados.

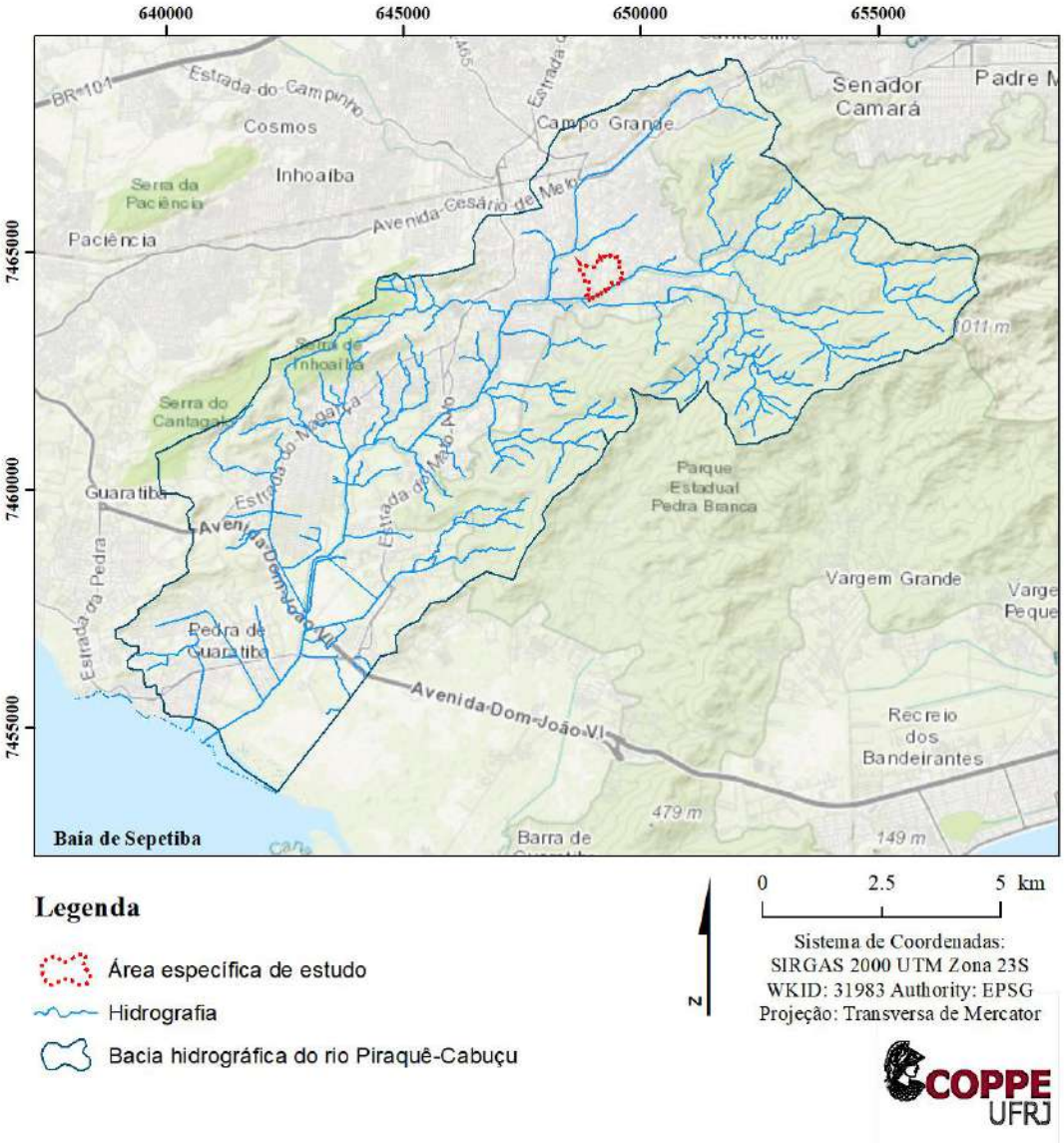

Figura 4-8. Localização da sub-bacia de interesse que será tratada como área específica de estudo para desenvolvimento da metodologia proposta. Fonte: Elaboração própria.

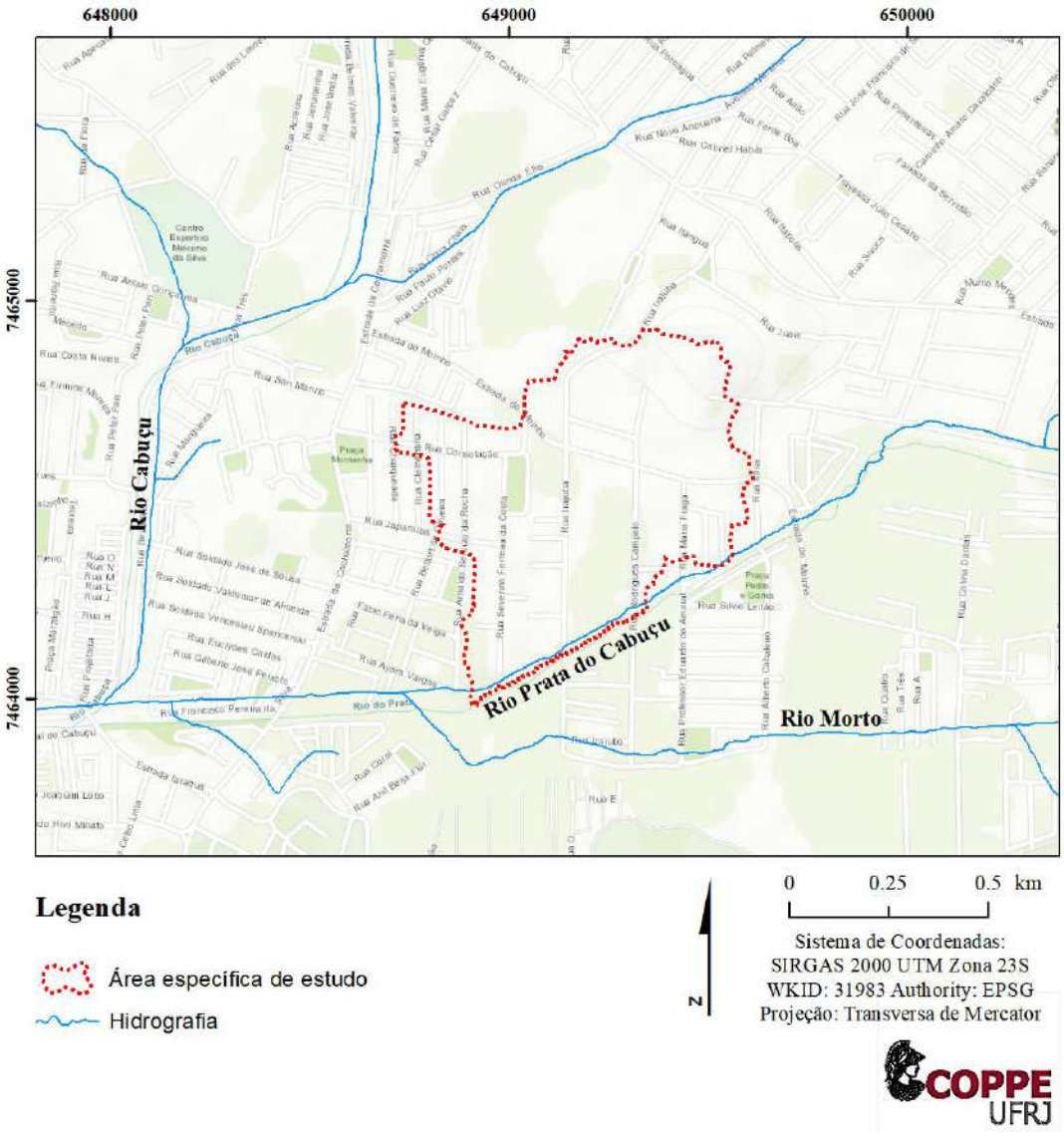

Figura 4-9. Delimitação da sub-bacia hidrográfica foco do presente estudo.
Fonte: Elaboração própria.



Figura 4-10. Principais elementos urbanos da sub-bacia de estudo. Fonte: Elaboração própria.

Os dados de topografia disponíveis para a região estão presentes no Modelo Digital do Terreno (MDT), disponibilizado para o município do Rio de Janeiro na escala 1:1000. Tais dados foram fundamentais para delimitação da bacia hidrográfica de interesse. Vale destacar em áreas urbanas a topografia, apesar de ser o principal dado de análise para divisão das áreas de contribuição, não é o único, visto que ações antrópicas no território podem ser responsáveis por dividir ou concentrar escoamentos de maneira diferente à observada observando apenas a topografia do terreno. A Figura 4-11 apresenta o MDT utilizado na região de estudo.

Analisando a topografia, é possível observar dois principais pontos altos localizados ao oeste e ao nordeste dos limites da área de estudo. As respostas dos escoamentos nestas regiões serão mais rápidas intensificando velocidades e vazões que poderão afetar os sistemas de drenagem.

Vale destacar também a extensa região plana localizada na rua Severino Ferreira da Costa que acaba por dificultar a implementação de redes de drenagem ou de esgoto, devido às declividades mínimas exigidas por estas estruturas hidráulicas. Em um cenário de extravasamento do rio Prata do Cabuçu neste trecho, afetaria de maneira significativa ruas e edificações, conforme será explorado nos tópicos seguintes.

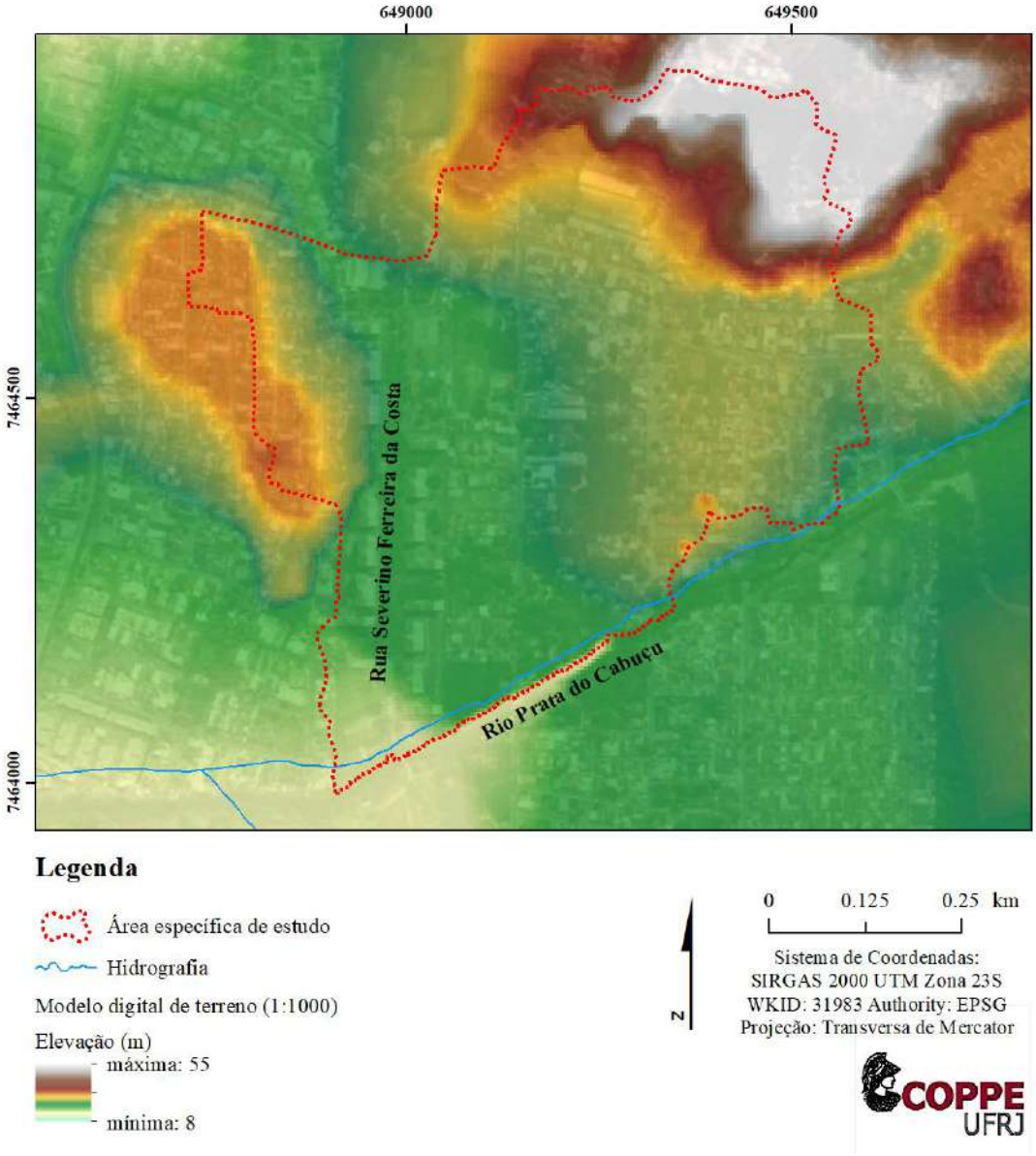

Figura 4-11. Modelo digital de terreno na região de interesse. Fonte: Elaboração própria.

Em relação aos principais elementos urbanos da sub-bacia a ser estudada destaca-se a estrada do Moinho, principal via que corta a área de estudo no sentido Leste-Oeste. Uma fotografia da rua em questão pode ser vista na Figura 4-12, na qual é possível observar uma linha de ônibus e diversos estabelecimentos comerciais. Podem ser destacadas ainda quatro vias perpendiculares à Estrada do Moinho, sendo elas as ruas: Severino Ferreira da Costa; Irajuba; Rodrigues Campêlo; e Maria Fraga. Estas vias podem ser vistas no mapa apresentado previamente na Figura 4-10.



Figura 4-12. Fotografia da Estrada do Moinho. Fonte: Google Street View (2022).

Além das ruas citadas destaca-se o II Colégio da Polícia Militar do Estado do Rio de Janeiro (II CPM/ERJ), localizado ao norte da sub-bacia, e duas escolas municipais localizadas na Rua da Consolação (Escola Municipal Professora Sonia Maria Maltez Fernandez e Escola Municipal Jesus Soares Pereira).

Vale destacar que a bacia apresenta diversos espaços livres, onde soluções para o amortecimento e tratamento das águas urbanas (águas pluviais e esgoto) podem ser exploradas. Além disso, nos espaços livres há o potencial de implementar soluções multifuncionais, podendo ofertar outras utilidades para o ambiente urbano. Levando em consideração os diversos espaços livres, vale destacar aqueles que já possuem um uso urbano, sendo os principais a Praça Pedro Veloso da Silveira, apresentada na Figura 4-13, e 5 campos de futebol espalhados pela sub-bacia que podem ser vistos na imagem de satélite da Figura 4-14.

Um outro equipamento comunitário que merece destaque é a igreja Santa Clara do Moinho, localizada às margens do rio Prata do Cabuçu e próxima a um campo de futebol. Uma imagem aérea da igreja pode ser vista na Figura 4-15. A sua localização em planta pode ser confirmada no mapa da Figura 4-10.



Figura 4-13. Fotografia da Praça Pedro Veloso da Silveira. Fonte: Google Street View (2022).

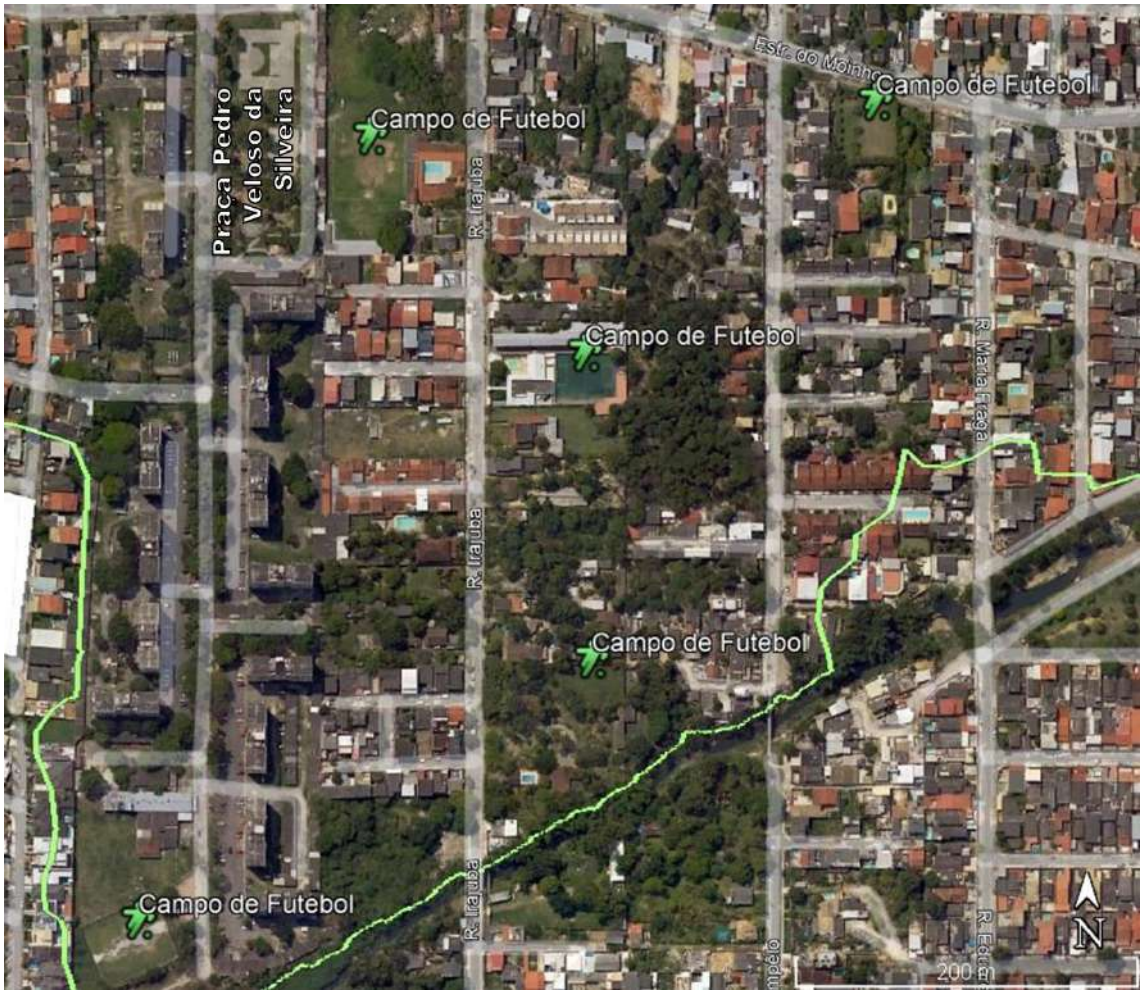

Figura 4-14. Principais espaços livres que já possuem uso urbano na sub-bacia em questão. Fonte: Google Earth (2022)



Figura 4-15. Fotografia da Igreja Santa Clara do Moinho e do campo de futebol. Fonte: Fotógrafo André Sant'anna para o Google.

Em relação aos setores de drenagem urbana e esgotamento sanitário, há fortes indícios que a região possui interações entre ambos os sistemas.

São verificadas contribuições no rio Prata do Cabuçu de águas urbanas, mesmo em tempo seco, que devem ser contribuições do sistema de esgotamento sanitário. A Figura 4-16 e Figura 4-17 apresentam galerias de drenagem que contribui para o rio Prata do Cabuçu, e mesmo em tempo seco, possuem efluentes.

Além disso, há edificações com tubulações, típicas de esgoto, lançadas diretamente no rio Prata do Cabuçu, conforme apresentado na Figura 4-18.

Adicionalmente, há diversos poços de visita de esgoto localizados próximos à poços de visita de drenagem pluvial. Este cenário não indica diretamente uma interação entre os sistemas, mas visto as demais evidências, há probabilidade que estes pontos configurem uma comunicação entre os sistemas. Vale ainda destacar que por mais que os sistemas não estejam diretamente comunicados, na prática, é de praxe que seja implementada uma estrutura de vertimento do sistema de esgotamento para o sistema de drenagem, caso venham a ocorrer falhas nas redes responsáveis por conduzir os esgotos urbanos. A Figura

4-19 apresenta um possível local de interação entre os sistemas, nas proximidades do rio Parta do Cabuçu.

Por outro lado, há indicativos de contribuição direta das edificações com esgotos domésticos ao sistema de drenagem. A Figura 4-20, por exemplo, mostra uma obra recente de uma edificação em direção a uma caixa ralo de drenagem, lá na Figura 4-21, é possível ver uma caixa ralo tampada, o que indica mau odor nessa região pela contribuição irregular do sistema de esgotamento sanitário.

Apesar de terem sido observadas imagens no local em dias sem chuva, é possível ver acúmulo de água nos logradouros, o que evidencia falhas no sistema de microdrenagem. A Figura 4-22, Figura 4-23 e Figura 4-24 comprovam os acúmulos de água citados, ocasionados por mal dimensionamento, ou falta de manutenção do sistema de microdrenagem.

Além das evidências citadas, segundo informações da Zona Oeste Mais Saneamento (2022) a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) mais próxima do local, ainda na bacia hidrográfica dos rios Piraquê-Cabuçu, é a ETE Areal, localizada no Caminho do Areal, S/Nº, no bairro de Guaratiba, a cerca de 5 km de distância linear em planta da área de estudo.



Figura 4-16. Contribuição de águas urbanas em tempo seco no rio Prata do Cabuçu. Fonte: Google Street View (2022).



Figura 4-17. Contribuição de águas urbanas em tempo seco no rio Prata do Cabuçu dentro da área de estudo. Fonte: Google Street View (2022).



Figura 4-18. Contribuição direta de sistema de esgotamento sanitário residencial na Rua Irajuba para o rio Prata do Cabuçu. Fonte: Google Street View (2022).



Figura 4-19. Exemplo de possível interação entre os sistemas de drenagem e de esgotamento sanitário antes da contribuição ao rio Prata do Cabuçu, na Rua Rodrigues Campêlo. Fonte: Google Street View (2022).



Figura 4-20. Exemplo de possível interação entre os sistemas de drenagem e de esgotamento sanitário na Rua Rodrigues Campêlo. Fonte: Google Street View (2022).



Figura 4-21. Caso típico de caixa ralo tampada devido ao mau odor gerado pela contribuição de esgotos domésticos no sistema de drenagem na rua Severino Ferreira da Costa.
Fonte: Google Street View (2022).

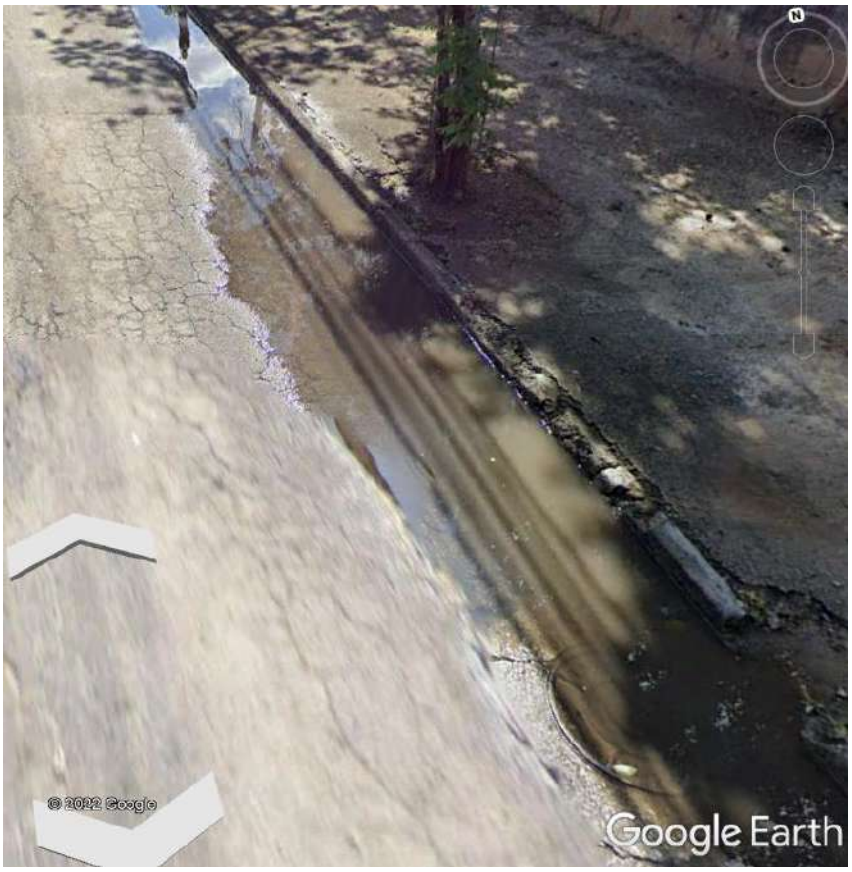

Figura 4-22. Acúmulo de água sobre tampa de poço de visita.
Fonte: Google Street View (2022).



Figura 4-23. Acúmulo de água na rua Severino Ferreira Costa, mesmo em tempo seco, evidenciando o mau funcionamento do sistema de drenagem. Fonte: Google Street View (2022).



Figura 4-24. Caixa ralo obstruída associada a acúmulo de água na rua Severino Ferreira Costa. Fonte: Google Street View (2022).

4.1.2 Estudos Hidrológicos

Os estudos hidrológicos foram conduzidos com base nas indicações do manual de instruções técnicas da Rio-Águas (2019), levando em conta que a bacia hidrográfica se localiza inteiramente na cidade do Rio de Janeiro.

Para determinação da chuva de projeto foi utilizada a equação que relaciona intensidade, duração e frequência obtida de dados pluviométricos do posto de Campo Grande, cuja área de abrangência engloba a maior parte da bacia hidrográfica. A Equação 4-1 apresenta os parâmetros para o posto pluviométrico de Campo Grande.

$$i = \frac{891{,}6.TR^{0{,}18}}{(t+14)^{0{,}689}} \qquad \text{Equação 4-1}$$

Na qual:
i = intensidade pluviométrica (mm/h)
TR = tempo de retorno ou tempo de recorrência (anos)
t = tempo de duração da precipitação (minutos)

Com a equação definida é necessário estimar o tempo de duração da chuva. O tempo de duração da precipitação definido para a chuva de projeto será igual ao tempo de concentração das bacias hidrográficas estudadas. Com esta consideração, é determinada uma chuva crítica na qual, em determinado momento, toda a bacia em questão contribui para o exutório, configurando um cenário crítico.

A equação utilizada para calcular o tempo de concentração é a determinada pela Fundação Rio-Águas (2019) e proposta por Ribeiro (1961). A Equação de George Ribeiro pode ser vista na Equação 4-2.

$$tc = \frac{16.L}{(1{,}05 - 0{,}2.p).(100.S)^{0{,}689}} \qquad \text{Equação 4-2}$$

Na qual:
tc = tempo de concentração (minutos)
L = comprimento do talvegue principal (km)
p = percentual de cobertura vegetal da bacia ($0 < p > 1$)
S = declividade média do talvegue principal (m/m)

Vale destacar que há outras equações disponíveis para determinação do tempo de concentração de bacia hidrográficas urbanas, todas apresentando resultados que não coincidem com os apresentados neste estudo. Dessa forma, este valor corresponde a um

tempo aproximado e sua escolha está fortemente associada à experiência técnica dos projetistas envolvidos no projeto de drenagem.

Para a bacia hidrográfica do sistema de macrodrenagem que engloba os rios Piraquê-Cabuçu e todos seus afluentes foram considerados o comprimento do talvegue principal de 23 km, percentual de cobertura vegetal de 0,59 (analisando o uso e ocupação do solo da região) e a declividade média de 0,02 m/m do talvegue principal. Aplicando a equação de George Ribeiro foi obtida uma chuva crítica de aproximadamente 400 minutos, ou 6,7 horas. Considerando os Tempos de Recorrência de 10, para o qual o sistema de microdrenagem deveria funcionar adequadamente, e o de 25 anos, indicado para o dimensionamento do sistema de macrodrenagem foram obtidas as intensidades de chuva e distribuídas temporalmente utilizando o método dos blocos alternados, indicado pela Rio-Águas (2019). Esta distribuição é a favor da segurança uma vez que considera chuvas críticas para diversos períodos de precipitação. Além disso, a parcela de chuvas nos tempos iniciais tem o potencial de preencher vazios naturais e urbanos e no momento da precipitação da maior lâmina, no cento do hietograma, há maior potencial de geração de escoamento superficial. A Figura 4-25 apresenta o hietograma elaborado para verificar o funcionamento do sistema de macrodrenagem de toda a bacia hidrográfica dos rios Piraquê-Cabuçu, considerando os dois TRs citados.

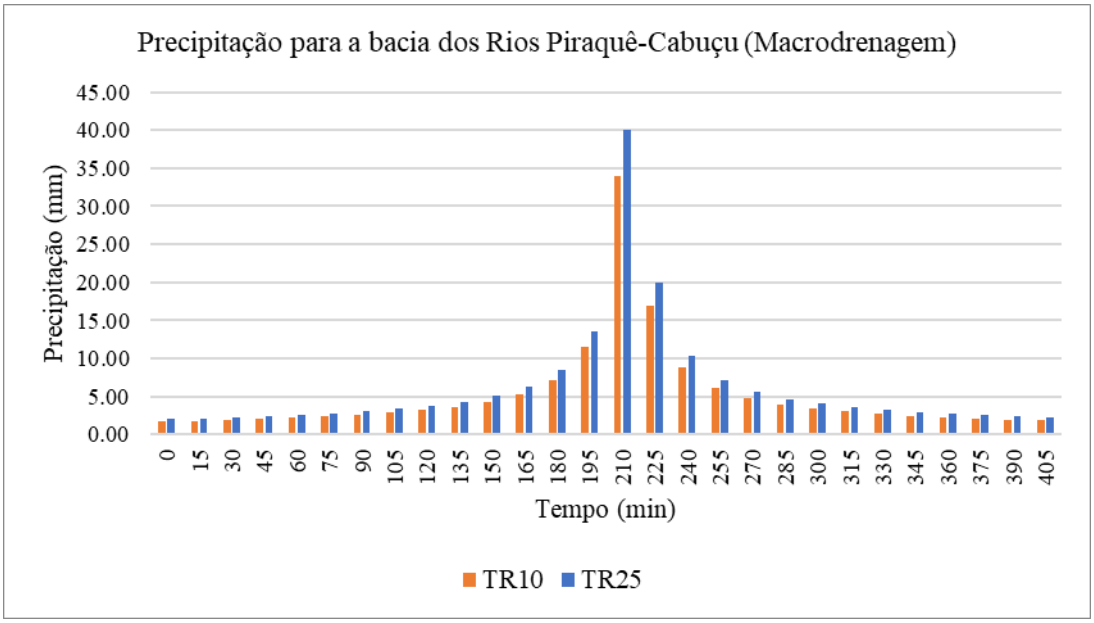

Figura 4-25. Chuva de projeto para o sistema de macrodrenagem considerando o TR de 25 anos, indicado para o dimensionamento do sistema. Fonte: Elaboração própria.

Em relação à sub-bacia hidrográfica na qual serão avaliadas as interações da rede de drenagem e de esgotamento sanitário, também utilizando a fórmula de George Ribeiro, foi obtido um tempo de concentração de 18 minutos aproximadamente. O tempo foi obtido considerando uma área de 0,5 km², o talvegue principal com 0,9 km, a cobertura vegetal de 0,2, e a declividade média de 0,03 m/m. Porém, vale destacar que para esta bacia faz-se necessário verificar a resposta hidráulica do rio Prata do Cabuçu. Assim, complementarmente, foi determinado o tempo de concentração do rio Prata do Cabuçu até a região de estudo. O valor obtido utilizando a Equação de George Ribeiro foi de aproximadamente 126 minutos. Para este cálculo foram determinados o comprimento do talvegue principal (7,5 km), a área de drenagem (19 km²), a declividade média (0,04 m/m) e o coeficiente de cobertura vegetal (0,8) da bacia em questão. Considerando as diferentes chuvas críticas para a bacia de macrodrenagem e para a bacia de microdrenagem, e que a simulação de ambos os sistemas ocorrerá de maneira conjunta, a distribuição dos blocos alternados se apresenta como metodologia útil para obter chuvas de projeto para tempos de concentração críticos em diversas escalas.

Para a sub-bacia as simulações serão desenvolvidas utilizando precipitações de tempos de recorrência de 10 e 25 anos. A Figura 4-26 apresenta os hietogramas das chuvas de projeto geradas para análise do funcionamento dos sistemas diante de eventos extremos.

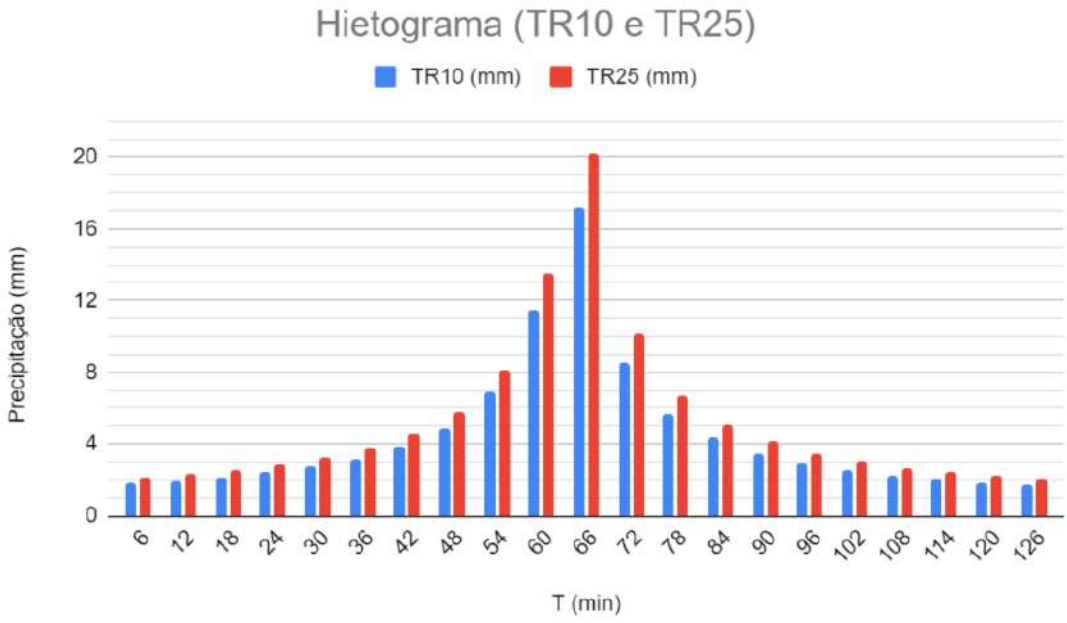

Figura 4-26. Hietograma das chuvas de projeto considerando os tempos de recorrência de 10 e 25 anos para a sub-bacia do rio Prata do Cabuçu e para a sub-bacia urbana foco do presente estudo. Fonte: Elaboração própria.

4.2 ETAPA 2 – MODCEL-SHIM para a bacia piloto

Após a determinação dos dados disponíveis e das chuvas será apresentado o processo de montagem do modelo hidrodinâmico para representação das cheias urbanas que afetam o sistema de macrodrenagem. Pela proximidade do caso de estudo ao rio Prata do Cabuçu, é prudente realizar esta simulação e verificar possíveis impactos da sobre-elevação do rio sobre os sistemas urbanos.

O próximo passo é a representação do sistema de microdrenagem da região. O sistema real implementado não possui cadastro, então, optou-se por realizar um novo dimensionamento que respondesse adequadamente às contribuições pluviais locais. Possíveis falhas do sistema, vistas na prática serão exploradas, em tópicos subsequentes.

Assim como apresentado para o sistema de microdrenagem, o sistema de esgotamento sanitário local não possui cadastro. Desta forma, foi dimensionado um sistema de esgotamento sanitário separador absoluto que respondesse adequadamente à contribuição do aporte de esgoto, como feito em dimensionamentos tradicionais. A única possível contribuição para além do esgoto sanitário foi a consideração de águas de infiltração, recomendada por norma.

O tópico de “Possíveis interações entre os sistemas” explora possíveis falhas de dimensionamento dos sistemas, bem como busca representar falhas cotidianas geradas pela má implementação das redes, falta de manutenção e colapso das estruturas. Para casos práticos, este tópico deverá ser substituído apenas pelos problemas identificados na região de estudo.

Finalmente, são apresentadas possíveis soluções para os problemas mapeados com foco no correto funcionamento das redes de drenagem e esgotamento, bem como na melhoria da qualidade de vida da população e mitigação dos impactos ambientais gerados.

4.2.1 Simulação do sistema de macrodrenagem

Vale destacar que a elaboração desta base de simulação contou com o apoio dos alunos e professores do projeto de extensão da UFRJ intitulado "Avaliação multicritério da resiliência às inundações como suporte ao planejamento do território e ao processo de construção social de percepção do risco". A calibração do modelo foi realizada no âmbito deste projeto de extensão utilizando como evento de calibração a chuva ocorrida em abril de 2010. Os resultados simulados apresentaram coerência quando comparados às áreas alagadas demarcadas pela Fundação Rio-Águas do município do Rio de Janeiro.

O modelo possui 1163 células de escoamento e foi construído de maneira tradicional para representar o escoamento nos cursos d'água e a possibilidade de extravasamento nas planícies naturais e urbanas. Dessa maneira, este modelo de representação da macrodrenagem não possui representação do sistema de microdrenagem. Das 1163 células que compõe o território delimitado pela bacia hidrográfica, 182 representam células de rio, 492 representam células com padrão de urbanização, 395 representam células do tipo reservatório e 94 representam células de planície não urbanizada. A divisão da bacia hidrográfica em células de escoamento pode ser vista na Figura 4-27.

O modelo de macrodrenagem ainda apresenta 1996 ligações das quais 13 representam galerias de macrodrenagem com dimensões retangulares, 7 representam bocas de lobo que realizam a comunicação superficial a essas galerias, 4 representam ligações de orifícios, 1562 representam ligações calculadas pela equação de Saint-Venant sem os termos de inércia (representando o escoamento a superfície livre em cursos d'água, ruas e áreas planas), e 410 representam ligações de vertimento, comumente associadas a comunicação de rios e suas margens.

Os intervalos de tempo de entrada de dados e de obtenção de resultados simulação são de 900 segundos (15 minutos) sendo rodado o modelo por 296 intervalos de tempo (296 x 15 minutos = 4440 minutos) de maneira a verificar a cheia fluvial tantos no momento da enchente como no período da vazante.

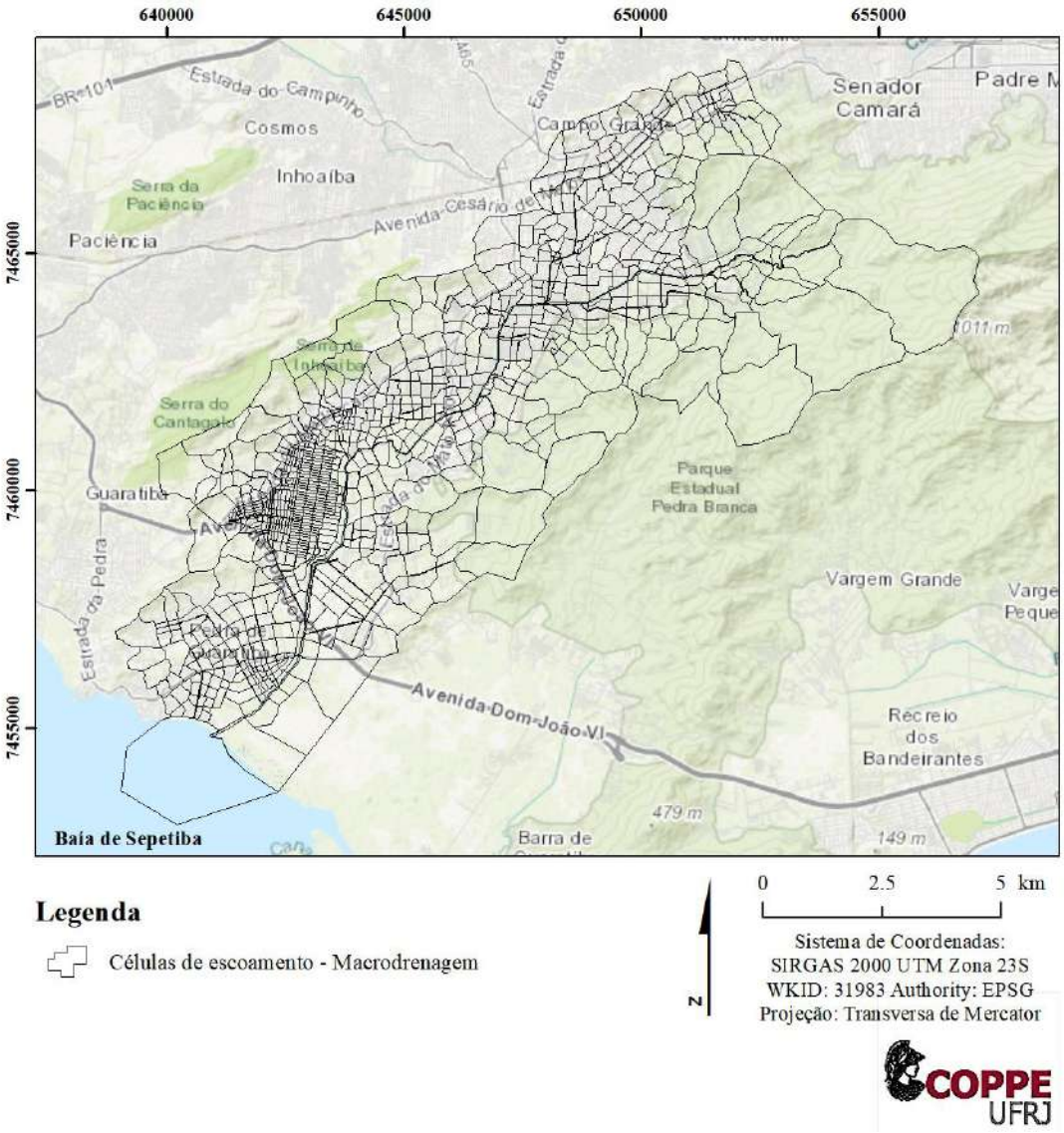

Figura 4-27. Divisão da bacia dos rios Piraquê-Cabuçu em células de escoamento para representação do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração conjunta com o projeto de extensão da UFRJ.

Como condição de contorno do modelo de macrodrenagem, foi considerada a variação de maré da Baía de Sepetiba no dia do evento de calibração, para o qual há informações disponíveis. Figura 4-28 apresenta a variação de níveis da Baía de Sepetiba utilizada como condição de contorno para o modelo. Vale destacar que para a região de interesse não há influência de maré sobre os escoamentos do rio Prata do Cabuçu, porém, de maneira a representar em sua integridade o escoamento no sistema de macrodrenagem, optou-se por realizar a simulação com esta consideração, representando um cenário mais próximo da realidade local observada.

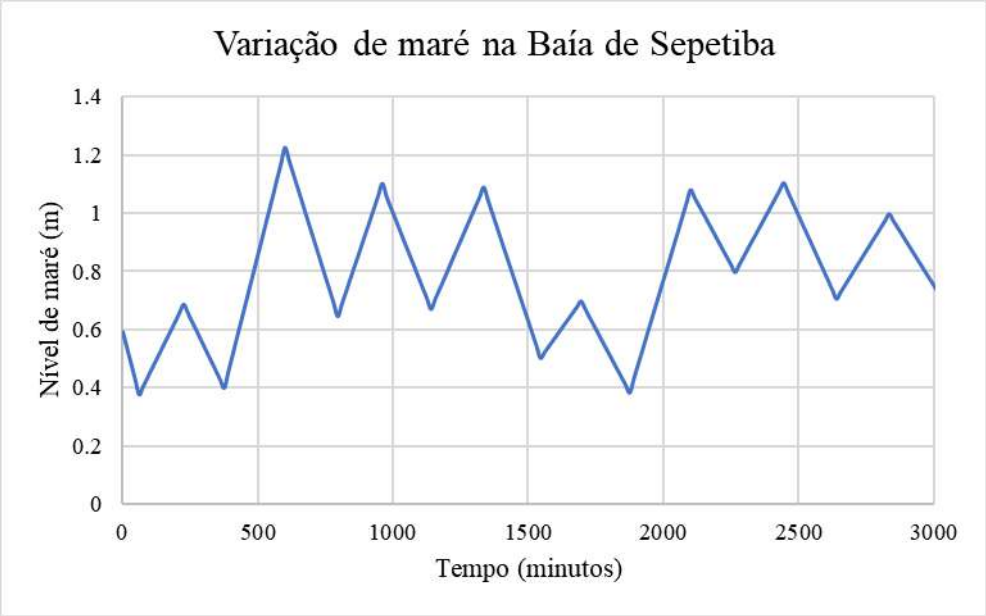

Figura 4-28. Variação de maré considerada como condição de contorno de jusante do modelo de macrodrenagem.

Os resultados para a simulação de macrodrenagem podem ser vistos em manchas de inundação na Figura 4-29 para o tempo de recorrência de 25 anos. A figura demarca também a área específica de interesse na qual será explorada detalhadamente a metodologia proposta pela aplicação do MODCEL-SHIM.

É possível observar que a região definida como área de estudo não é a mais crítica da bacia hidrográfica, porém, são observados acúmulos de água superiores a 30 centímetros, ocasionados pela falha do sistema de drenagem.

Como citado anteriormente, optou-se por escolher uma região na qual os problemas de macrodrenagem não fossem a principal questão, de maneira a poder explorar com maior profundidade as interações entre o sistema de drenagem local e o sistema de esgotamento sanitário.

Por outro lado, foi escolhida uma região que ainda sofre com os remansos do rio principal de maneira a dificultar o escoamento do sistema de microdrenagem e a potencializar as interações com o sistema de esgotamento sanitário.

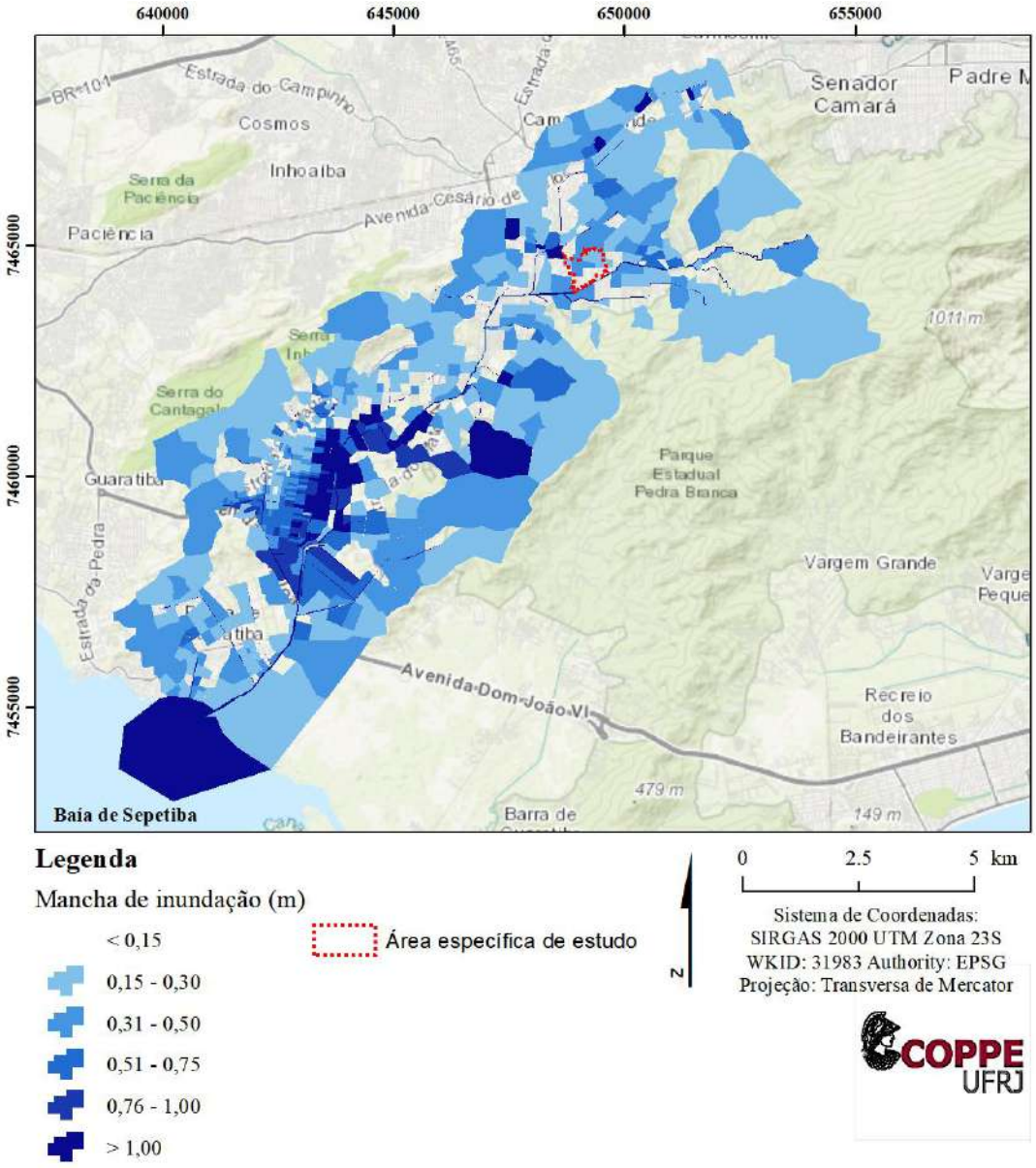

Figura 4-29. Resultados da simulação do sistema de macrodrenagem da bacia do rio Piraquê-Cabuçu para o TR25 anos. Fonte: Elaboração conjunta com o projeto de extensão da UFRJ.

A partir da simulação hidrodinâmica do sistema de macrodrenagem foi obtido o hidrograma no rio Prata do Cabuçu que será utilizado como condição de contorno para a simulação da sub-bacia que representa a área de interesse do presente trabalho.

A Figura 4-30 apresenta o hidrograma no rio em questão. Para os tempos de recorrência de 10 e 25 anos, obtendo respectivamente vazões de pico de aproximadamente 43 e 51 m^3/s.

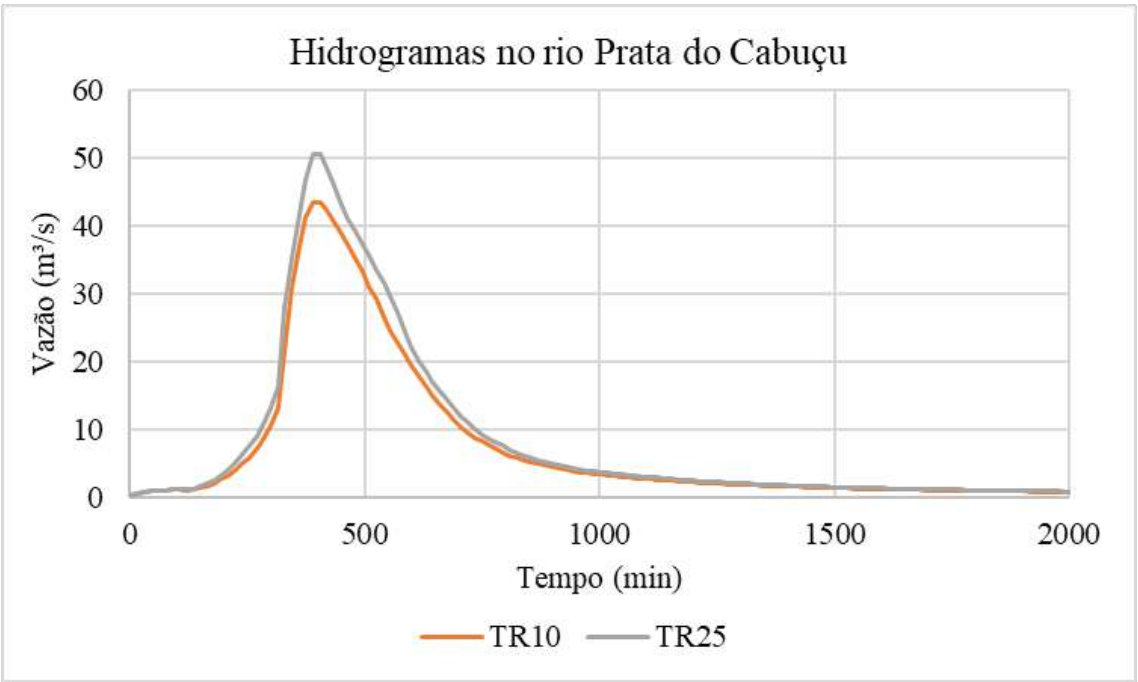

Figura 4-30. Hidrograma representando a variação de vazão no rio Prata do Cabuçu para o TR 25, ao qual contribui a região de interesse. Fonte: Elaboração própria.

4.2.2 Simulação do escoamento superficial

Diferente do modelo de macrodrenagem anteriormente apresentado, para esta representação há uma maior discretização espacial da divisão de células. O modelo de escoamento superficial foi elaborado por células que representam ruas, lotes edificados, áreas livres de ocupação e telhados.

A partir das informações topográficas da região, esta foi subdividida em células de escoamento, que, interligadas entre si por equações hidráulicas, simulam os fluxos das águas urbanas da sub-bacia.

O modelo possui 711 células de escoamento sendo 9 representadas por células do tipo rio e 702 representadas por células de planície não urbanizada.

As células fluviais do rio Prata do Cabuçu, poderão receber uma condição de contorno de vazão determinada pela simulação integral da bacia. Esta consideração é importante para simular possíveis efeitos de remanso sobre as redes urbanas da sub-bacia nos períodos de cheias fluviais.

A representação por planícies não urbanizadas é uma simplificação e adaptação do modelo de células de escoamento para a lógica de representação em menor escala. Há uma quantidade relevante do território que representa áreas urbanas, porém, a discretização na escala de lote e rua inviabiliza a utilização de células do tipo área urbana, uma vez que os patamares de acúmulo de água dados pelos padrões de urbanização, não serão mais representativos. Dessa forma, todas as células são simplificadas a formas prismáticas, com arestas verticais perpendiculares a base, para o acúmulo de água.

Em relação às 702 células representadas de maneira prismática, 148 representam ruas, 254 representam lotes urbanizados, 46 representam lotes não urbanizados e 254 representam os telhados, que sem sistema de drenagem, contribuem diretamente para as vias.

Em relação às conexões utilizadas para esta simulação superficial são totalizadas 723 ligações. Destas conexões 153 representam a equação de Saint-Venant para o escoamento superficial entre células de ruas (P), e mais 36 para o escoamento superficial entre lotes sem edificações (P). Há mais 6 ligações de vertimento com o rio principal (V), e 285 ligações de vertimento entre ruas e edificações (V). Finalmente, foram incorporadas 243

ligações de orifícios (O1) entre telhados e o sistema viário para representar a contribuição pluvial das edificações diretamente para as ruas, sem a existência de um sistema de drenagem. A Figura 4-31 representa de maneira esquemática as ligações entre as células de lotes e telhados com as células de ruas e a Figura 4-32 mostra a divisão da área de interesse em células de escoamento

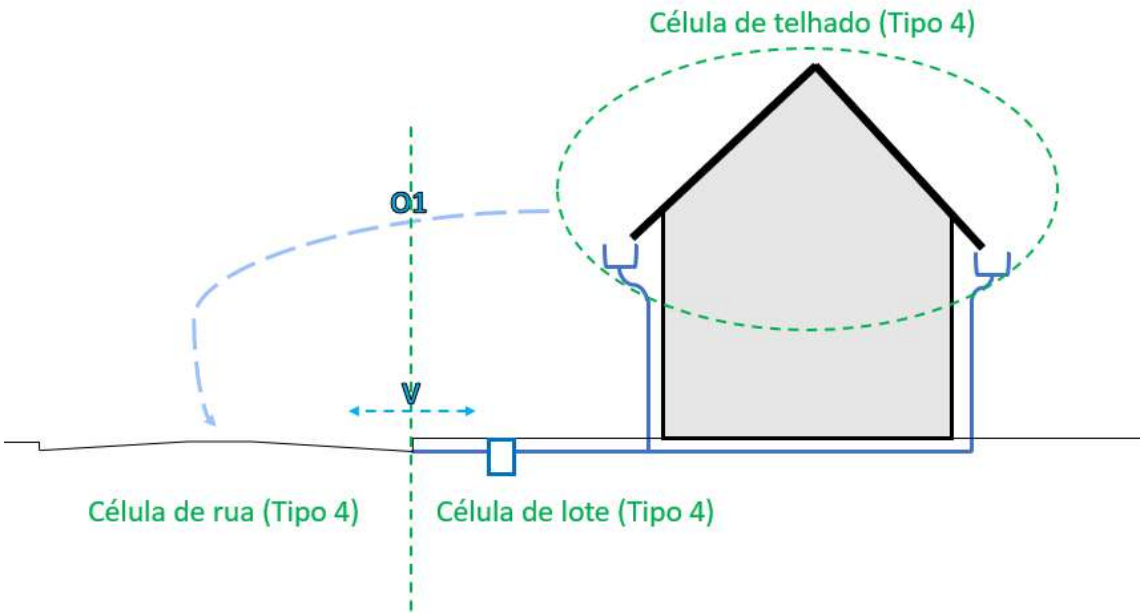

Figura 4-31. Representação esquemática da comunicação entre lotes e ruas pela equação de vertimento, bem como a ligação de orifício e ruas devido à falta de sistema de drenagem urbano. Fonte: Elaboração própria.

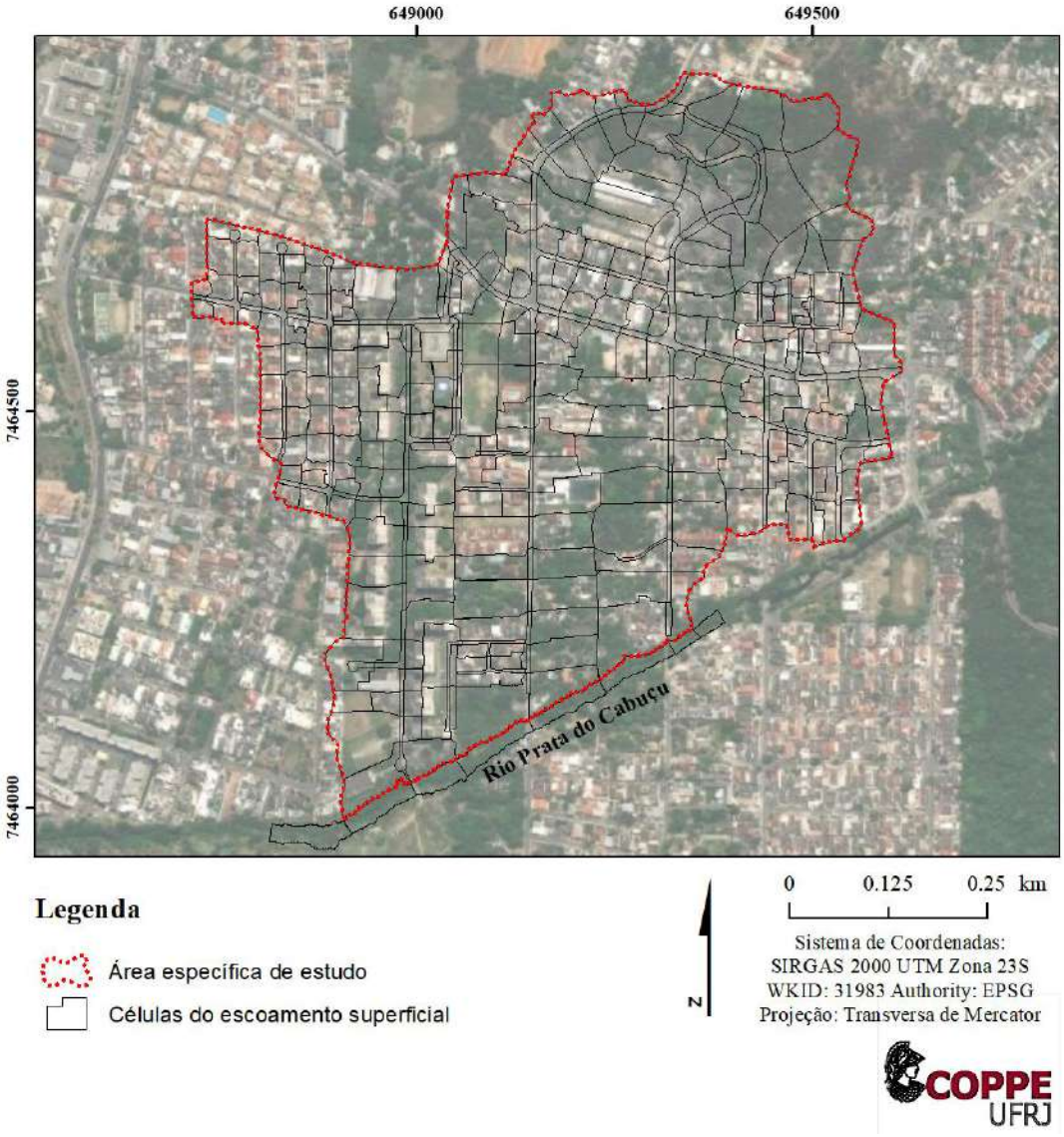

Figura 4-32. Divisão da área de interesse em células de escoamento par representação do escoamento superficial. Fonte: Elaboração própria.

Os resultados da simulação da primeira camada, correspondente ao sistema superficial são apresentados por mancha de inundação na Figura 4-33 para o tempo de recorrência de 10 anos. Para este resultado são observados alagamentos de 1,19 m na região noroeste da sub-bacia, que correspondem a uma região com depressões naturais do terreno. Está área está impedida de escoar para o norte por conta das diversas edificações que limitam os fluxos nesta direção. Esta área demanda a implementação de sistema de microdrenagem para poder esvaziar. Em outra região próxima à estrada do Moinho são vistos alagamentos na rua de 67 centímetros. Está área também corresponde a uma depressão natural do terreno, porém, menos acentuada que a anterior. Outras depressões

naturais de alagamentos podem ser vistas na região leste da sub-bacia. Além disso, as 4 vias principais apresentam alagamentos.

Os locais com maior acúmulo de água indicam que a região demanda um sistema de microdrenagem subsuperficial para drenar os locais que correspondem a depressões topográficas. Soluções de drenagem superficial como valetas, sarjetas e sarjetões não resolveriam o acúmulo de água nessas regiões. Além disso, a Rio-Águas indica a implementação de sistema de drenagem subsuperficial com a implementação de bocas de lobo, poços de visita e galerias de drenagem para áreas urbanas. Além disso, a incorporação de um sistema subsuperficial possibilita que as lâminas de alagamentos em eventos pluviométricos intensos não se acumulem nas vias e, assim, as infraestruturas da cidade continuem a prestar seus serviços.

Complementarmente, na Rua Severino Ferreira da Costa são observados alagamentos de 40 centímetros, na rua Irajuba alagamentos de cerca de 30 centímetros, na rua Rodrigues Campêlo 35 centímetros e na rua Maria Fraga alagamentos de 42 centímetros. Na principal via da sub-bacia, a Estrada do Moinho, foram observados alagamentos de 25 centímetros, suficientes para dificultar o acesso da população à linha de ônibus local.

O campo de futebol ao lado da igreja se apresenta como um local favorável para o acúmulo de água, uma vez que sem nenhuma intervenção, já acumula naturalmente parte das águas pluviais, alagando 33 centímetros em uma área de 5649 m².

Para o tempo de recorrência de 25 anos os resultados são apresentados na mancha de inundação da Figura 4-34. Como esperado, os alagamentos são intensificados com a elevação da recorrência do evento pluviométrico. Na região mais crítica da bacia, localizada a noroeste, os alagamentos passam a ser de 1,34 metro, 15 centímetros a mais que os vistos para o TR 10. Para a Estrada do Moinho há um aumento de apenas 2 centímetros.

Considerando um cenário de possível contribuição do rio Prata do Cabuçu, foi simulado um cenário de chuva com tempo de recorrência de 25 anos em toda a bacia do rio principal. Como apresentado anteriormente, a vazão no rio Prata do Cabuçu foi utilizada como condição de contorno de vazão do modelo e aplicada na célula de rio localizada mais a montante. Dessa maneira, é possível simular um cenário de sobrelevação do rio principal e verificar os impactos sobre a região de interesse.

Assim, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 4-35. É possível observar que para a simulação da camada superficial a sobre-elevação dos níveis do rio Prata do Cabuçu, considerando um TR de 25 anos não ocasiona incremento dos acúmulos de água no local.

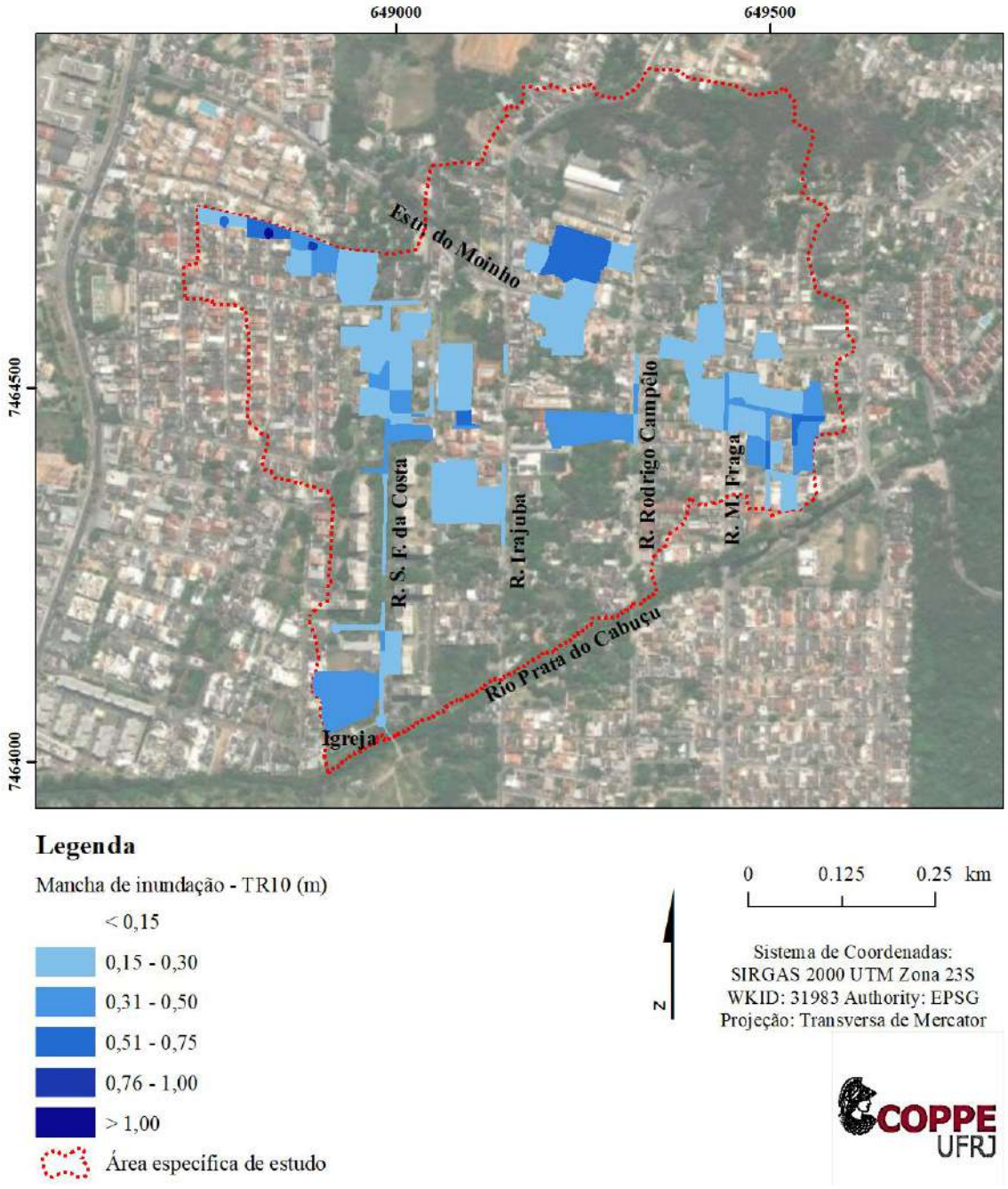

Figura 4-33. Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 10 anos considerando apenas a camada superficial da sub-bacia de estudo, sem contribuição do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração própria.

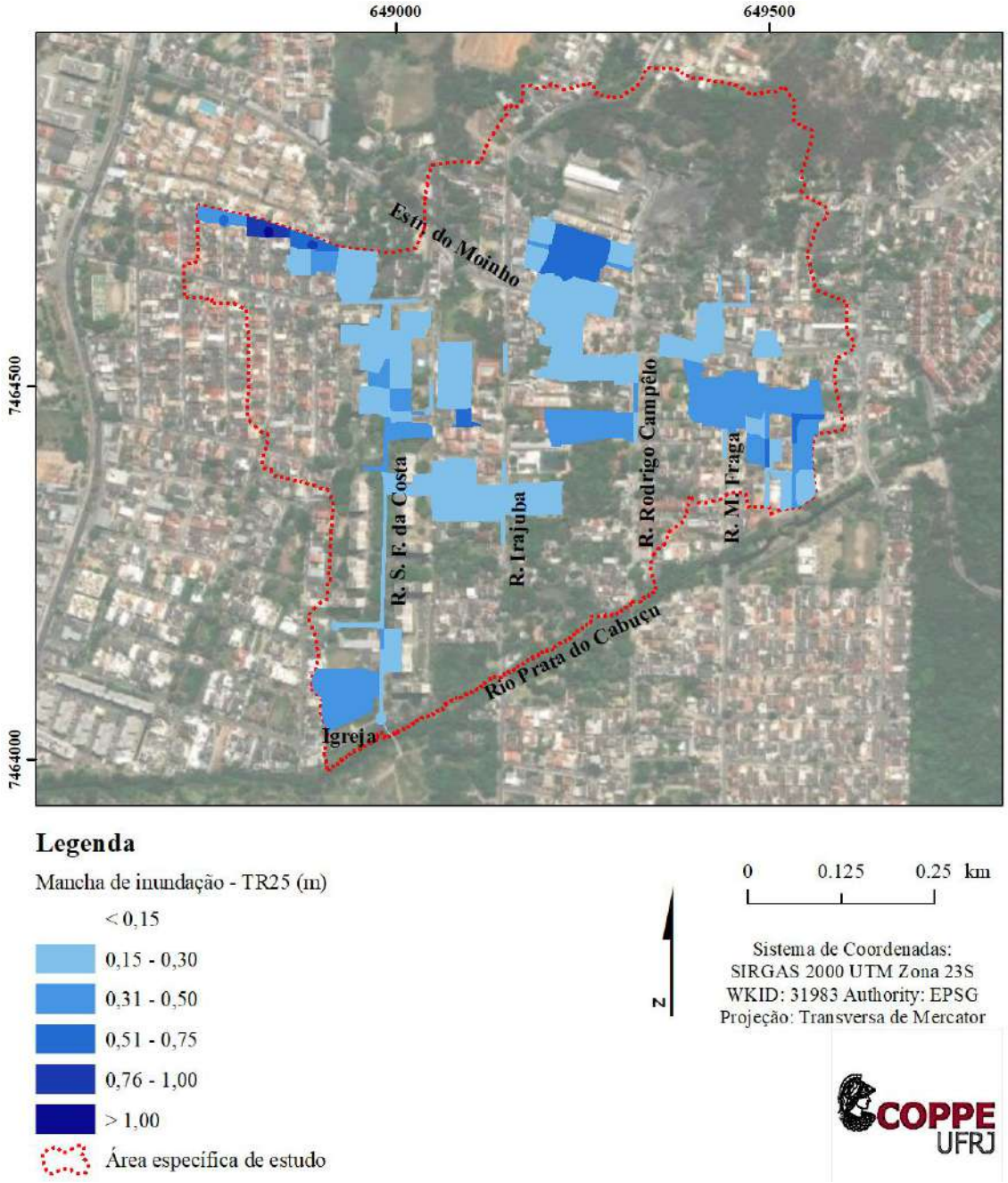

Figura 4-34. Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 25 anos considerando apenas a camada superficial da sub-bacia de estudo, sem contribuição do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração própria.

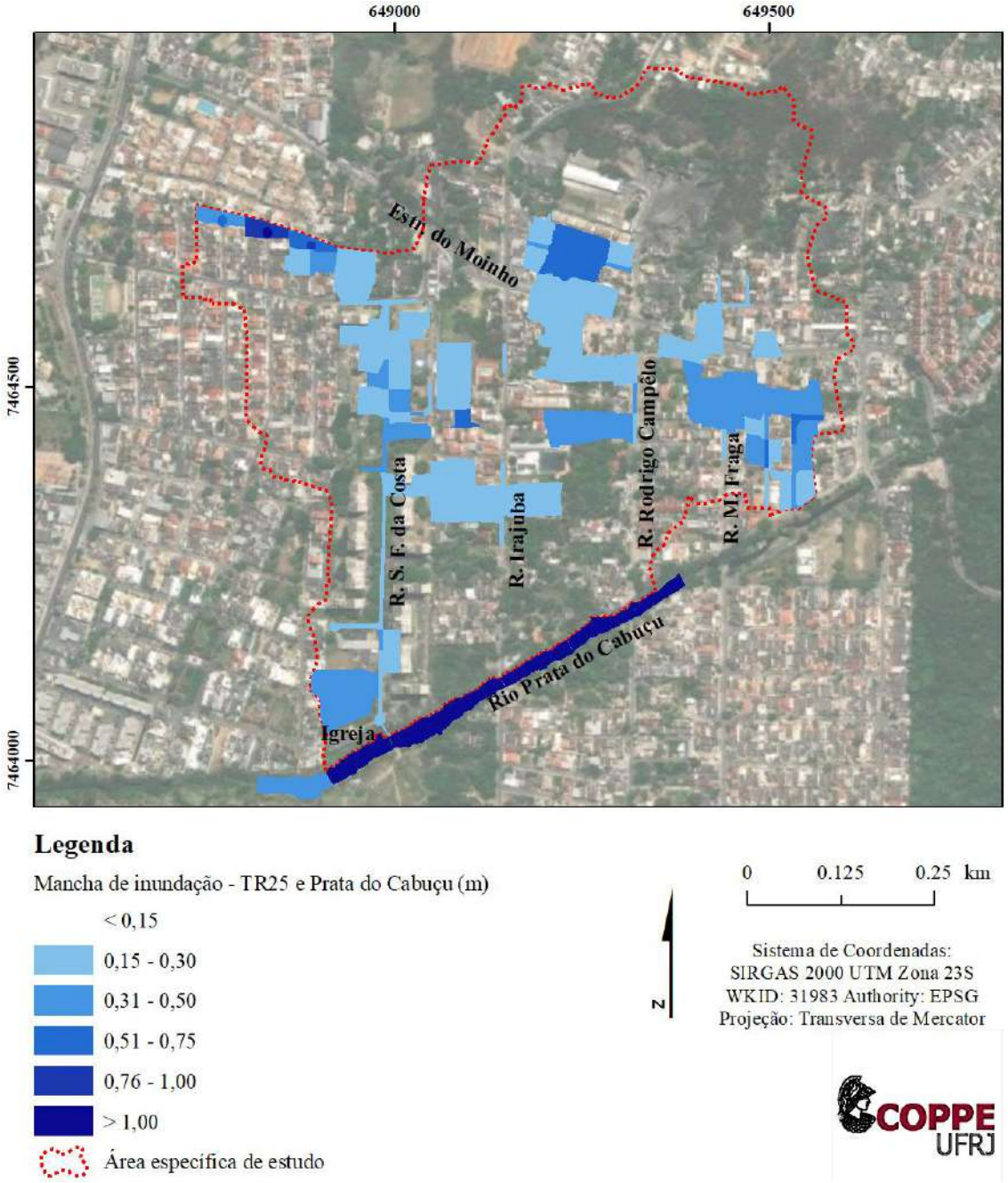

Figura 4-35. Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 25 anos considerando apenas a camada superficial da sub-bacia de estudo, com contribuição do sistema de macrodrenagem pela sobre-elevação do nível do rio Prata do Cabuçu. Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Simulação do sistema de microdrenagem

Para a incorporação desta camada de simulação complementar ao MODCEL-SHIM foi necessário desenvolver um projeto de microdrenagem para a região de interesse. Vale destacar, que há indicativos que a região já possui sistema de microdrenagem implementado, mas devido à falta de dados para fazer sua representação, foi optado por dimensionar e simular um novo sistema de drenagem. Falhas da microdrenagem serão mais bem exploradas no mapeamento da interação entre os sistemas.

O dimensionamento elaborado por Ramos (2022) e supervisionado durante a execução do presente trabalho seguiu os critérios básicos indicados por RIO-ÁGUAS (2019), cujo manual foi explorado na Revisão Bibliográfica (Capítulo 2).

Foram delimitadas 3 bacias principais de contribuição para desenvolver o dimensionamento. A bacia 1, localizada ao oeste possui 0,15 km² de área, a bacia 2 localizada na porção central da área de estudo possui 0,13 km² e a bacia 3 localizada ao leste possui uma área de contribuição de 0,21 km². A Figura 4-36 apresenta o traçado das bacias de contribuição ao sistema de microdrenagem.

Em relação à contribuição para cada PV (Poço de Visita) a própria divisão de células de escoamento apresentada no tópico anterior foi aproveitada, uma vez que leva em consideração tanto a topografia local como as contribuições de cada loteamento. O traçado proposto para a rede de drenagem também pode ser visto Figura 4-36.

Vale destacar que foram idealizados 140 PVs de drenagem para viabilizar o projeto, cada PV por sua vez foi representado como sendo uma célula do tipo planície natural, cuja adaptação foi anteriormente explicada. Foram projetados 140 trechos de galerias entre os PVs totalizando 4962 metros de rede. Estes trechos entre PVs são representados no MODCEL-SHIM por ligações de galerias circulares (G2) que podem representar tanto o escoamento a superfície livre, como, em caso de falhas, o escoamento sob pressão. No total foram propostos 2081 m de rede com diâmetro de 400 mm, 414 metros com 500 mm, 124 m com 600 mm, 231 m com 700 mm, 182 m com 800 mm, 113 m com 900 mm, 362 m com 1000 mm, 726 m com 1200 mm e 729 m com 1500 mm.

Sousa (2017) destaca que a modelagem da rede de microdrenagem pode ser representada pela definição de Poços de Visita como células de escoamento, associadas a células

superficiais de ruas. A célula de microdrenagem terá área e cota de fundo igual ao PV (a área terá um acréscimo referente ao acúmulo de água nas próprias galerias) e realizará conexão com a superfície com ligações preestabelecidas do Tipo-Bueiros (M2) que representam os ralos ou bocas de lobo e ligações Tipo-Comporta FLAP (F) que representa o transbordamento do PV. A Figura 4-37 apresenta de maneira esquemática as ligações envolvidas na camada superficial e na camada subsuperficial do sistema de drenagem, bem como as possíveis ligações entre camadas.



Figura 4-36. Delimitação das bacias de contribuição para dimensionamento do sistema de microdrenagem. Fonte: Elaboração própria.

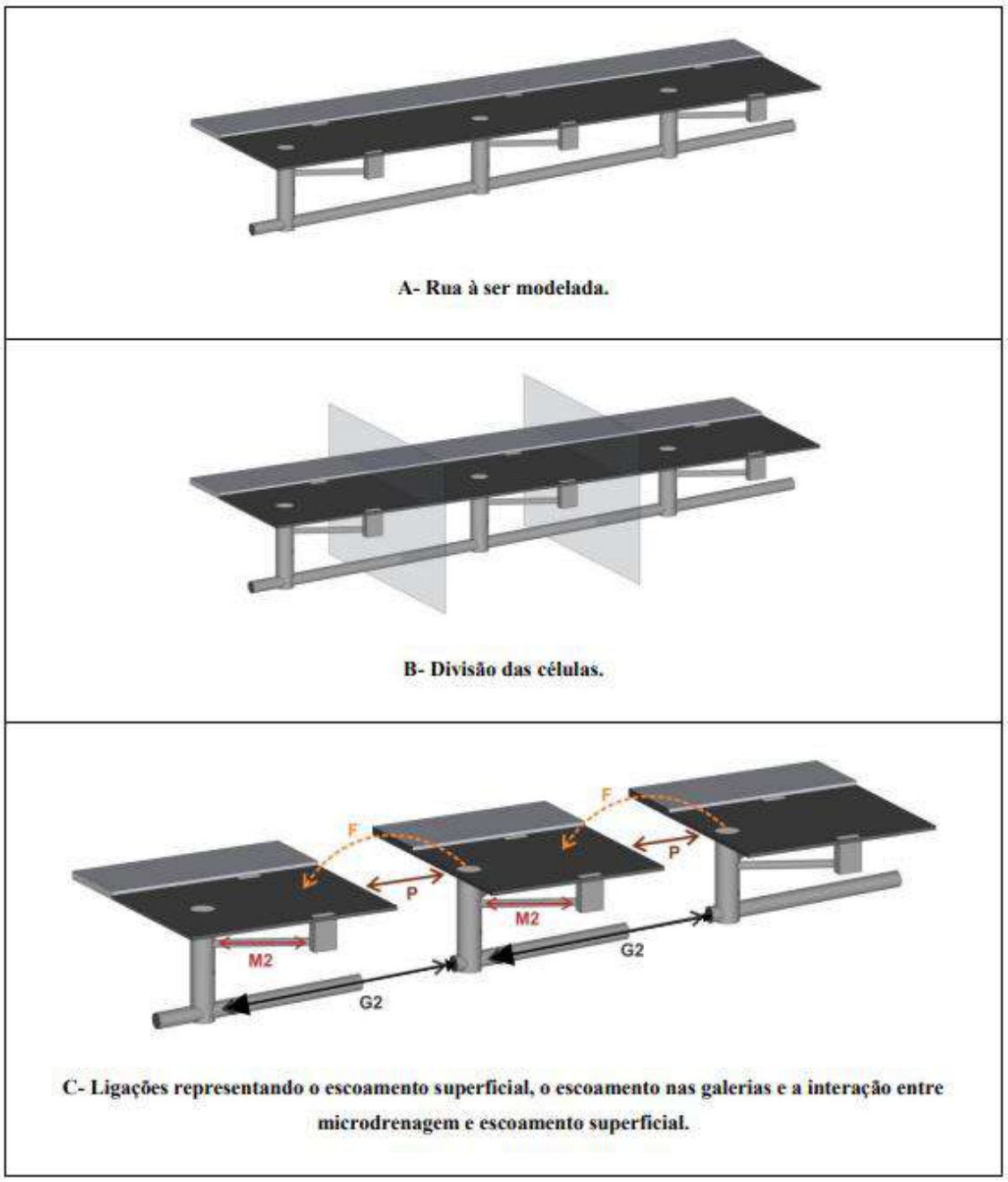

Figura 4-37. Representação de uma galeria e do escoamento em duas camadas.
Fonte: Sousa, 2017.

Adicionalmente, para representar uma situação ideal do sistema de drenagem, os telhados foram conectados por ligações de orifícios (O1) aos PVs, simulando conexões prediais ao sistema de drenagem urbano. Ao todo foram adicionadas 243 ligações de orifício entre telhados e PVs. A Figura 4-38 apresenta de maneira esquemática a conexão entre telhados e poços de visita para o sistema de drenagem.

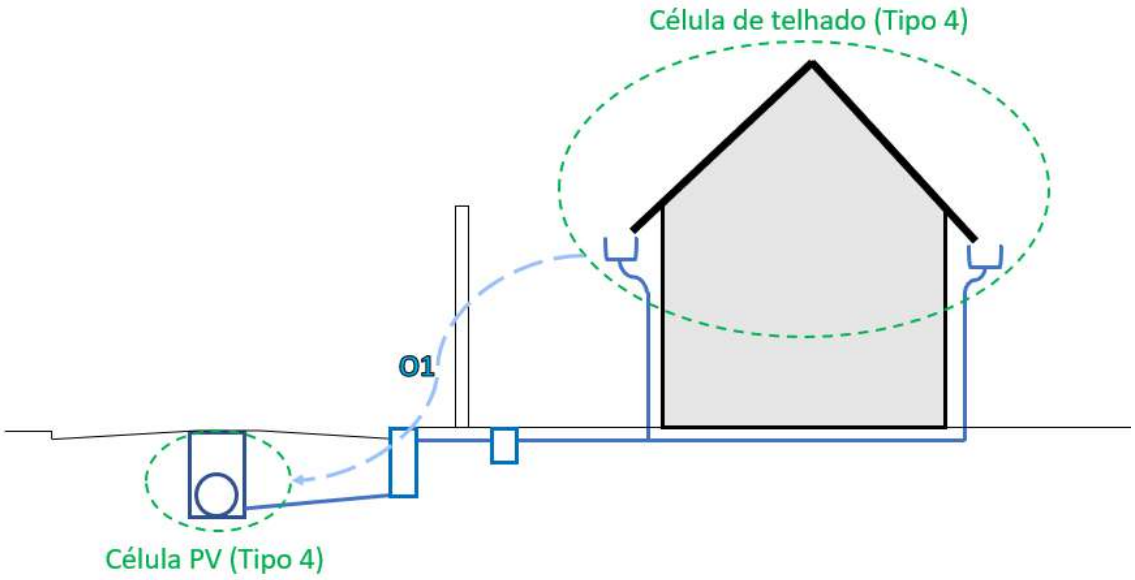

Figura 4-38. Representação esquemática da conexão entre telhados e poços de visita para o sistema de drenagem, levando em conta a conexão predial e urbana. Fonte: Elaboração própria.

Os perfis principais das redes de drenagem podem ser vistos na Figura 4-39, Figura 4-40 e Figura 4-41, para os sistemas 1, 2 e 3, respectivamente. Vale destacar que devido à baixa declividade observada nos trechos finais das redes de drenagem e ao incremento de aporte de águas pluviais no final das bacias, as tubulações dos 3 sistemas contribuem ao exutório com diâmetros e 1500 mm.

O dimensionamento das redes foi realizado utilizando o tempo de retorno de 10 anos, mas, após a implementação das redes de drenagem no MODCEL-SHIM foi verificado seu funcionamento para o tempo de recorrência de 25 anos.

Os perfis apresentados já possuem algumas correções do dimensionamento inicial realizado com planilha. Estas correções foram guiadas após a obtenção dos resultados com o modelo hidrodinâmico, principalmente para os resultados do tempo de recorrência de 25 anos. Otimizações nos trechos finais para reduzir os diâmetros obtidos não foram realizadas de maneira a manter uma configuração mais a favor da segurança, característica de um dimensionamento mais simplificado.

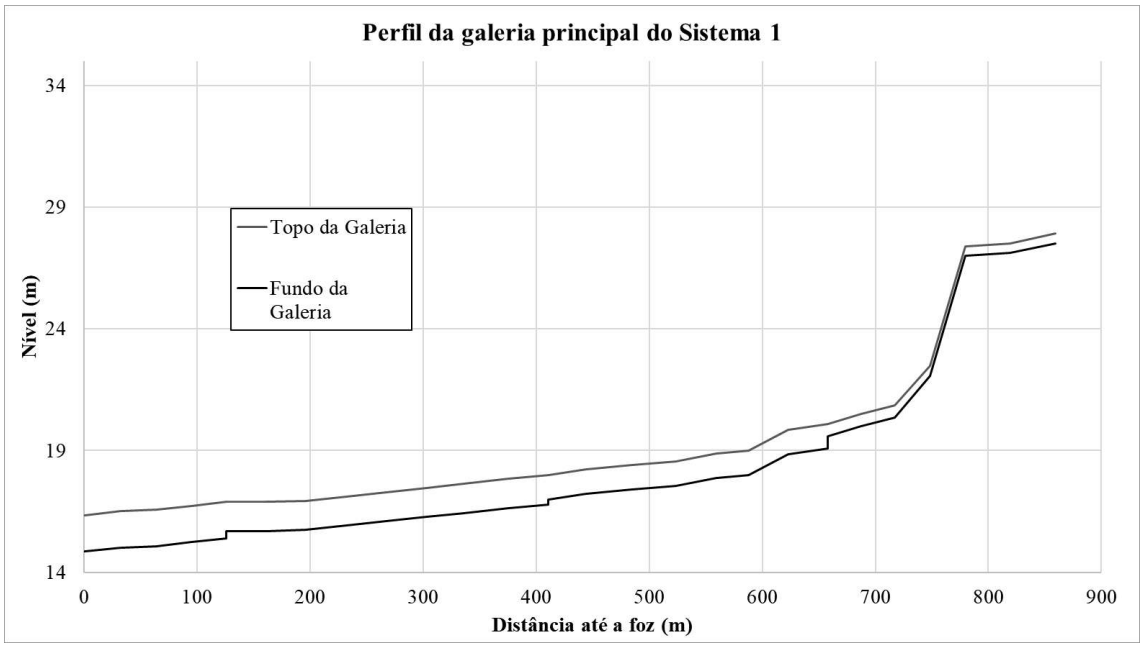

Figura 4-39. Perfil da galeria principal do sistema 1 de drenagem da área de estudo.
Fonte: Elaboração própria.

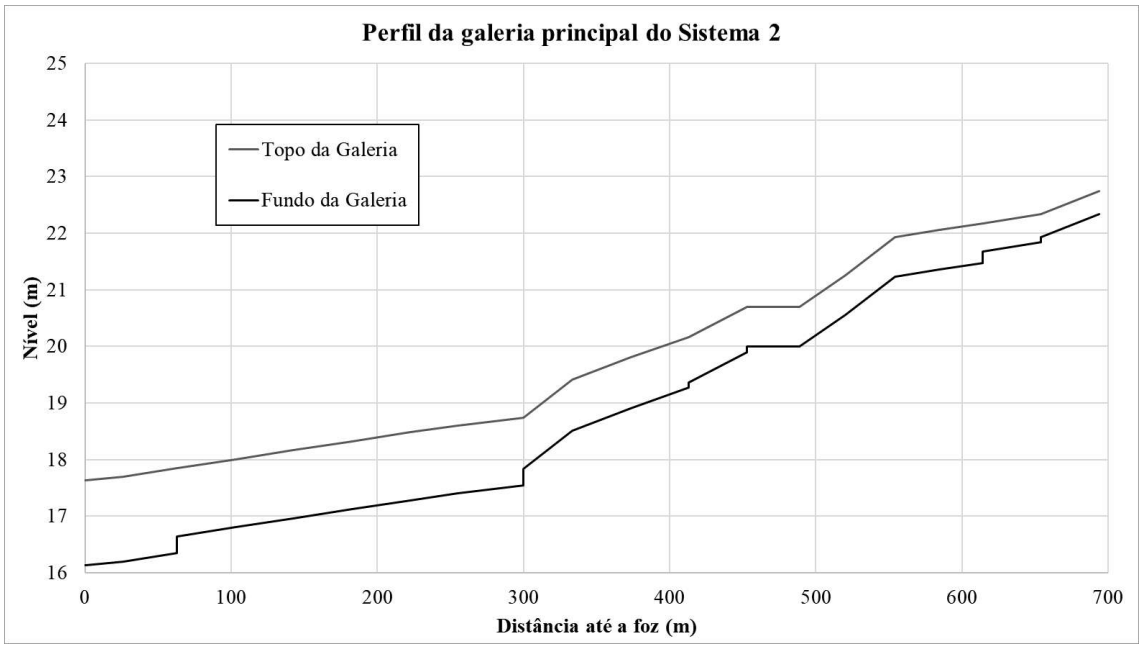

Figura 4-40. Perfil da galeria principal do sistema 1 de drenagem da área de estudo.
Fonte: Elaboração própria.

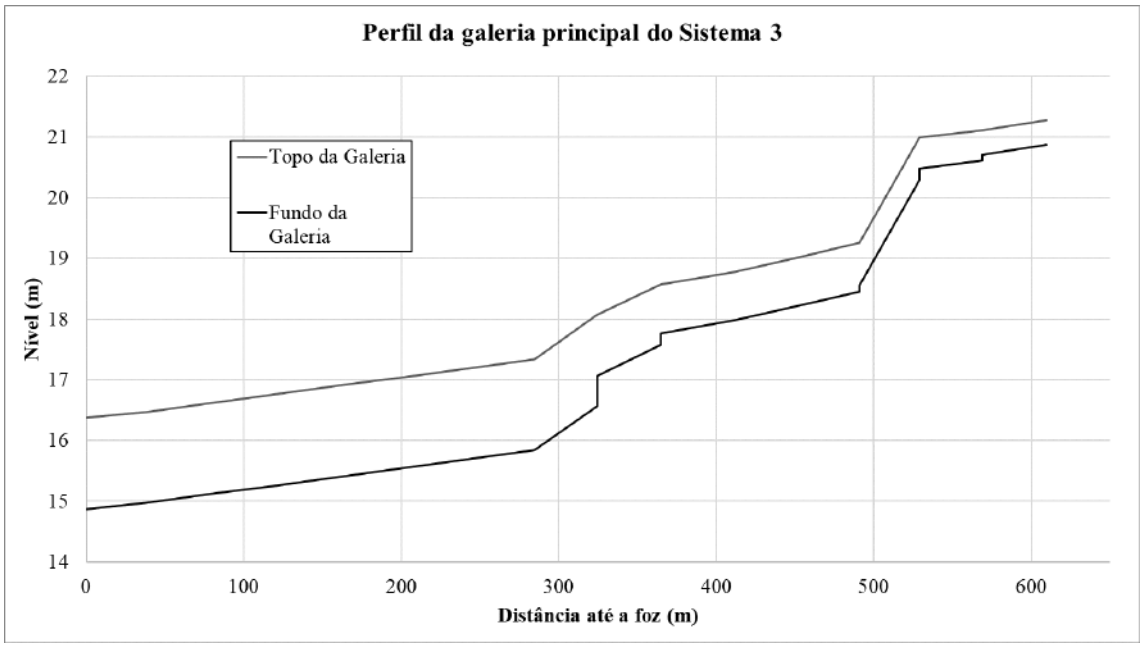

Figura 4-41. Perfil da galeria principal do sistema 1 de drenagem da área de estudo.
Fonte: Elaboração própria.

Após a montagem do modelo para representar a camada superficial interagindo com a camada subsuperficial do sistema de microdrenagem foram realizadas as simulações para os eventos de referência com tempos de recorrência de 10 e 25 anos.

Os resultados por mancha de inundação para o TR10 são apresentados na Figura 4-42, na qual é possível observar que não há acúmulo de água na superfície para o evento simulado. Adicionalmente, a Figura 4-43, a Figura 4-44 e a Figura 4-45 apresentam os perfis das principais galerias de drenagem das bacias de drenagem 1, 2 e 3, respectivamente. Os referidos perfis apresentam os níveis de água máximos simulados no interior dos sistemas de drenagem para o TR10.

É possível observar que o sistema de drenagem projetado se comporta adequadamente para cumprir seu papel de não acumular água nos logradouros para o TR10, que é comumente utilizado para o dimensionamento de sistemas de microdrenagem.

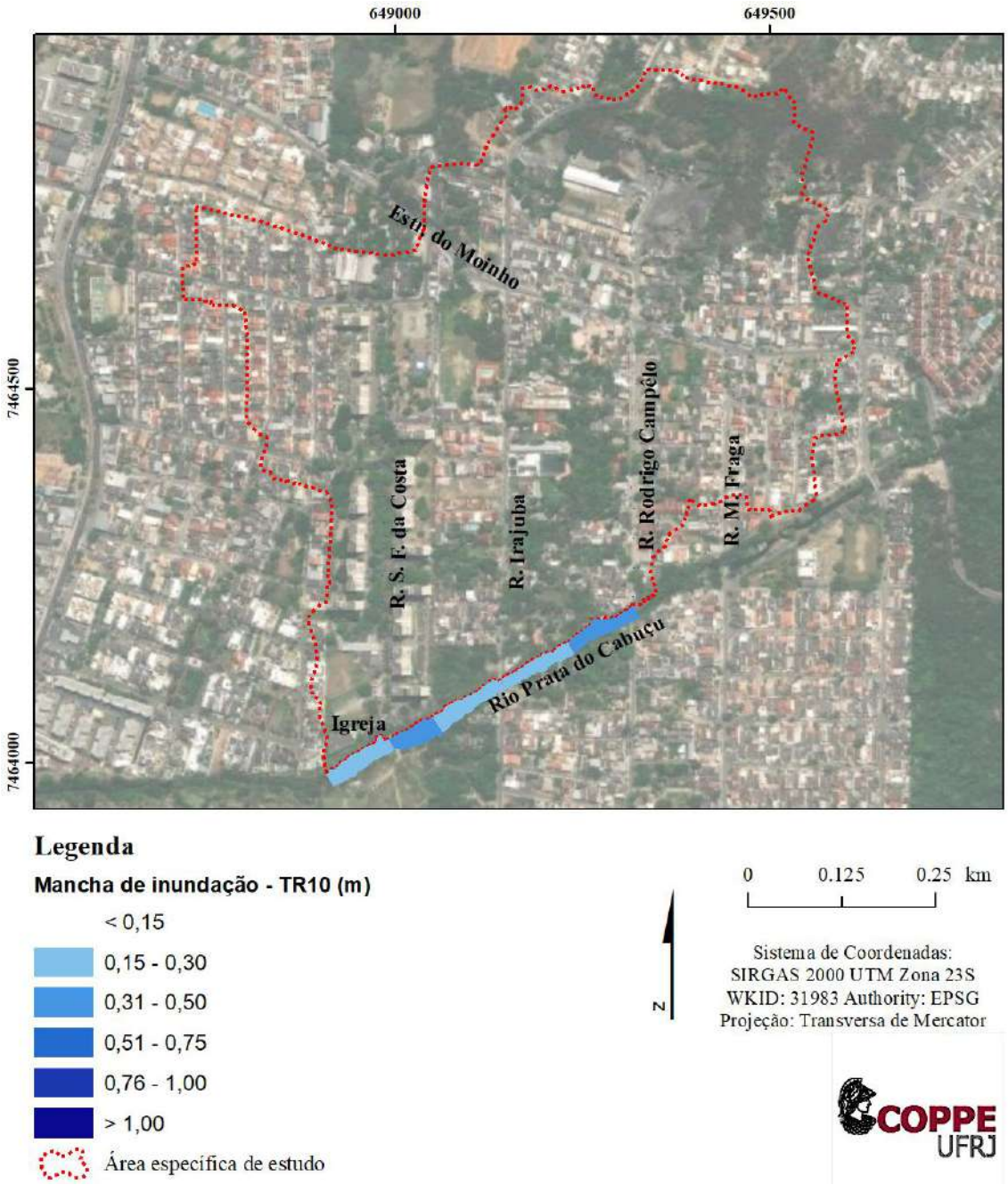

Figura 4-42. Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 10 anos considerando a camada superficial da sub-bacia de estudo e a camada do sistema de microdrenagem, sem contribuição do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração própria.

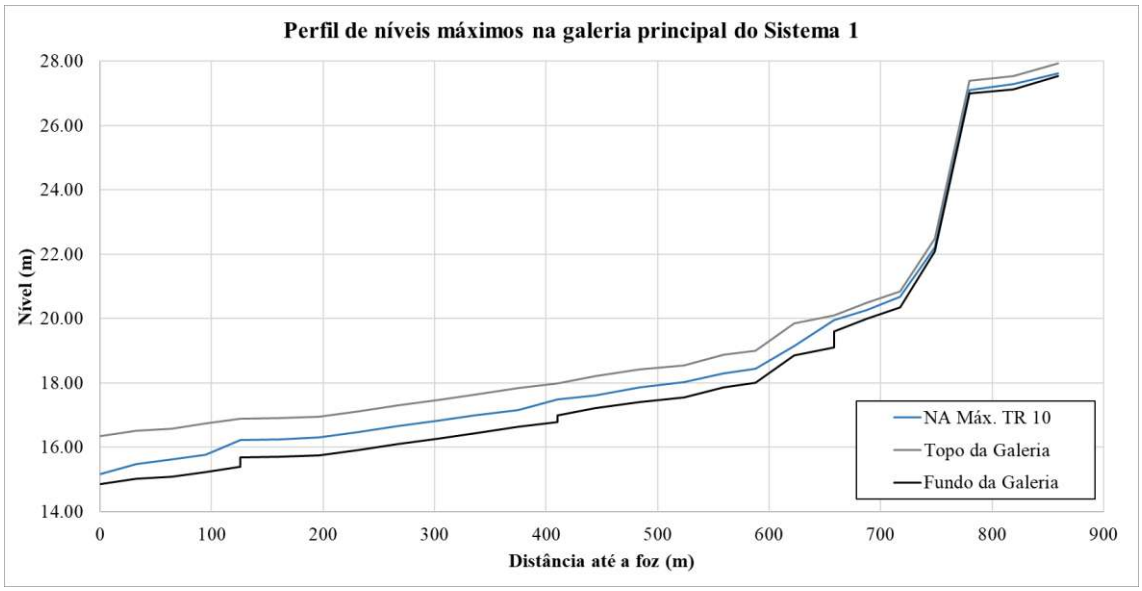

Figura 4-43. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 1 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 10 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria.

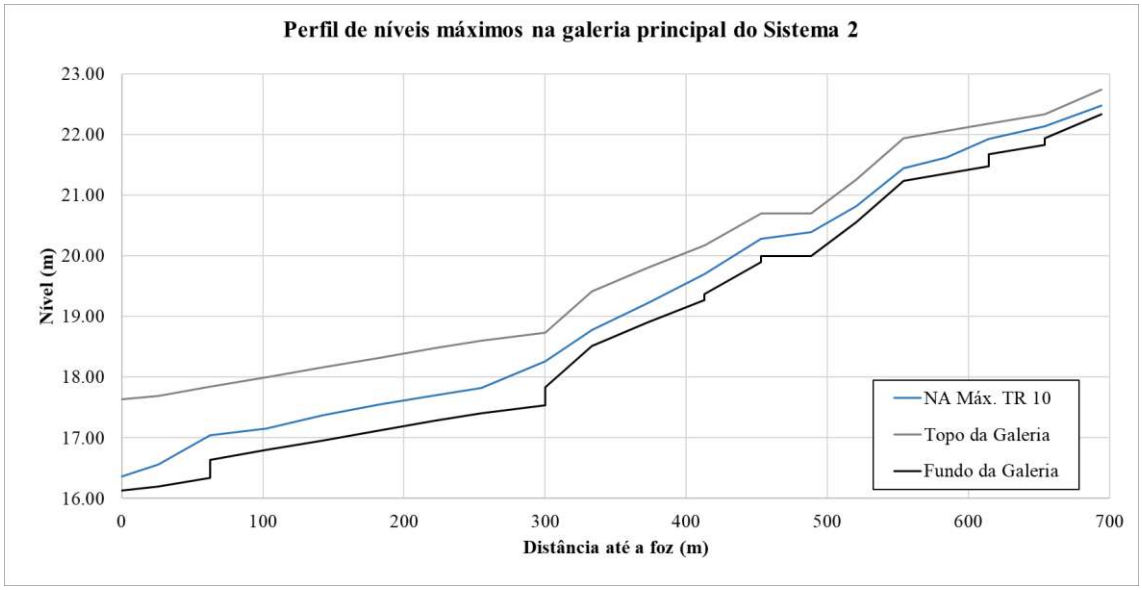

Figura 4-44. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 2 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 10 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria.

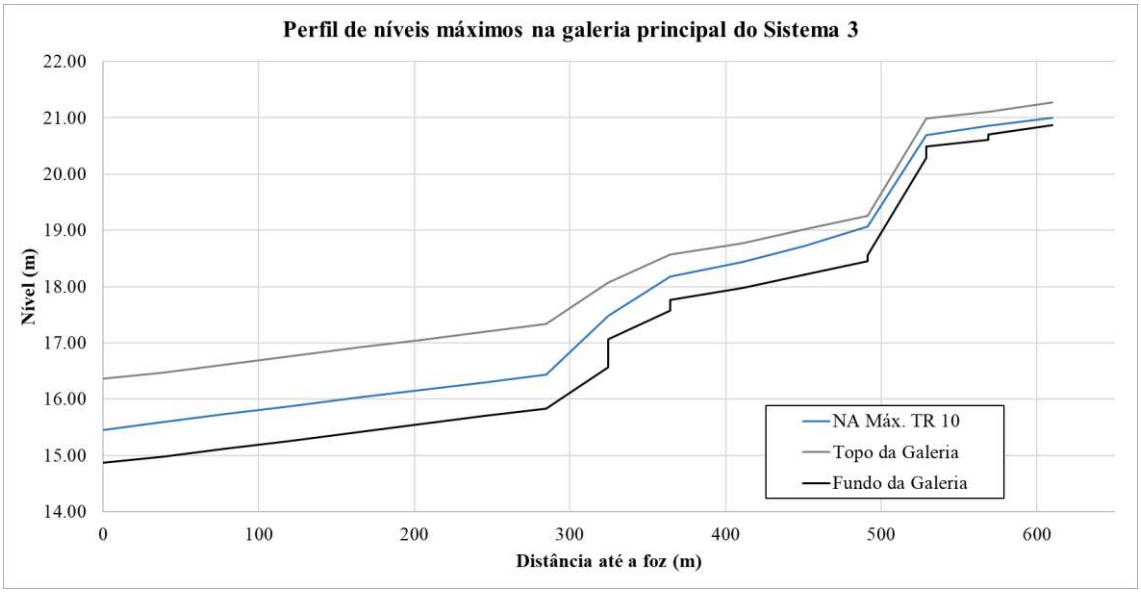

Figura 4-45. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 3 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 10 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria.

Complementarmente, foram realizadas as simulações das camadas superficiais e subsuperficiais de drenagem para o TR25. Analogamente aos resultados anteriormente apresentados para o TR10, a Figura 4-46 mostra a mancha de inundação, enquanto a Figura 4-47, a Figura 4-48 e a Figura 4-49 apresentam os perfis de níveis máximos nas galerias dos sistemas 1, 2 e 3, para o TR25.

É possível observar que o sistema continua funcionando com folga para este tempo de recorrência mais elevado, o que evidencia um superdimensionamento ocasionado pela maneira tradicional de dimensionar o sistema de microdrenagem.

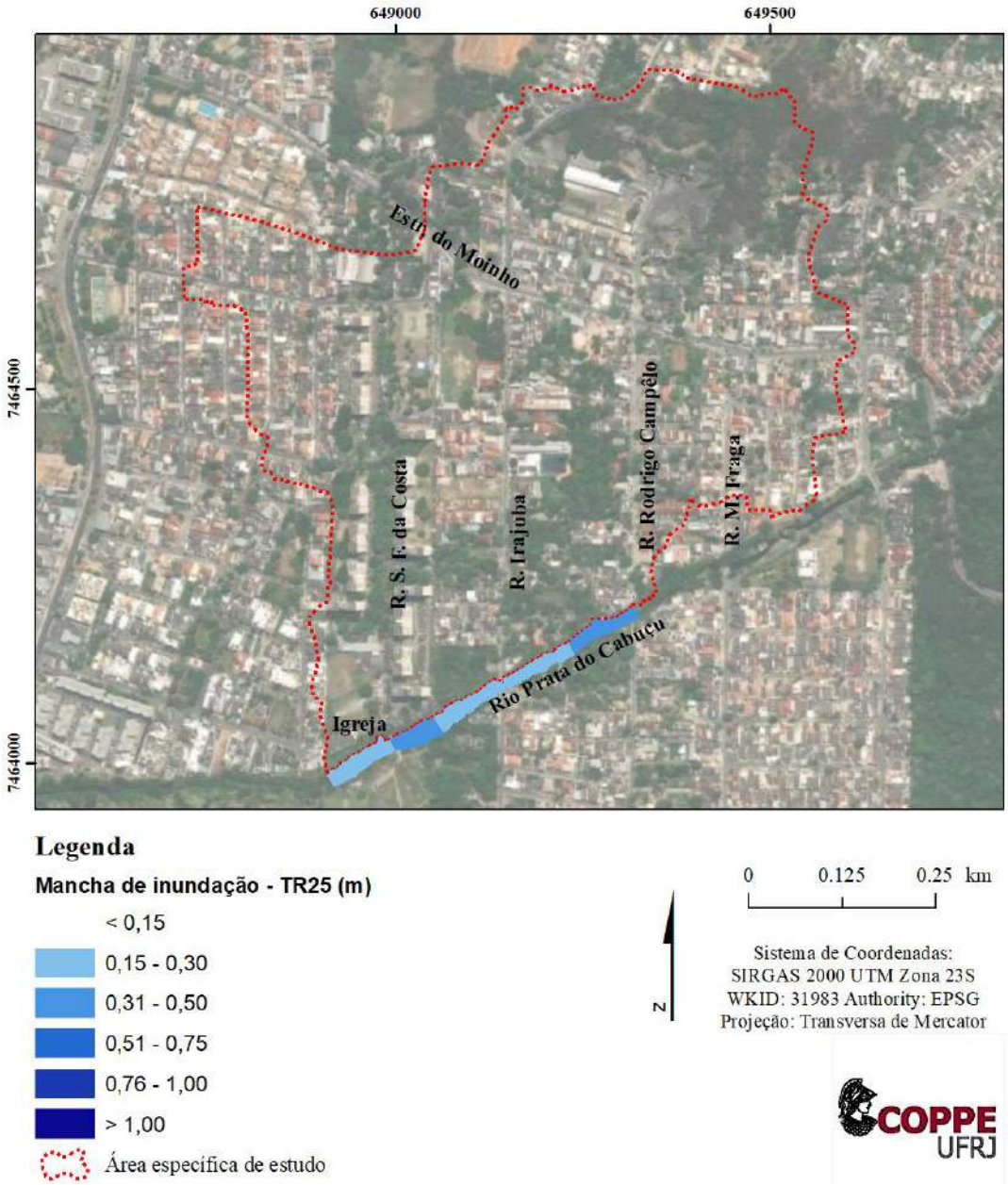

Figura 4-46 Mancha de inundação para o tempo de recorrência de 25 anos considerando a camada superficial da sub-bacia de estudo e a camada do sistema de microdrenagem, sem contribuição do sistema de macrodrenagem. Fonte: Elaboração própria.

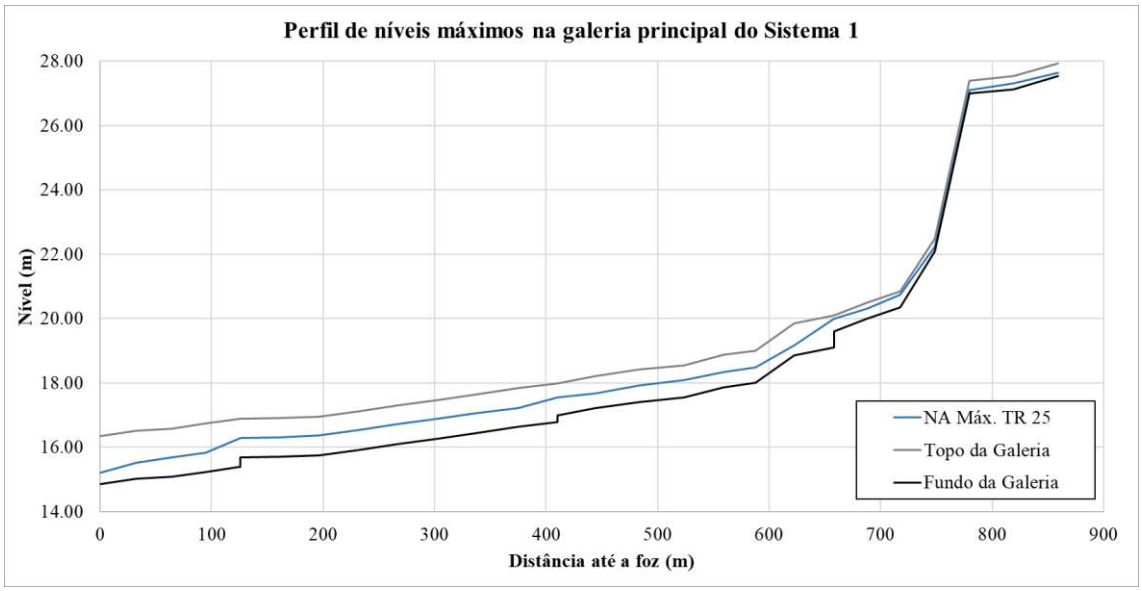

Figura 4-47. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 1 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 25 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria.

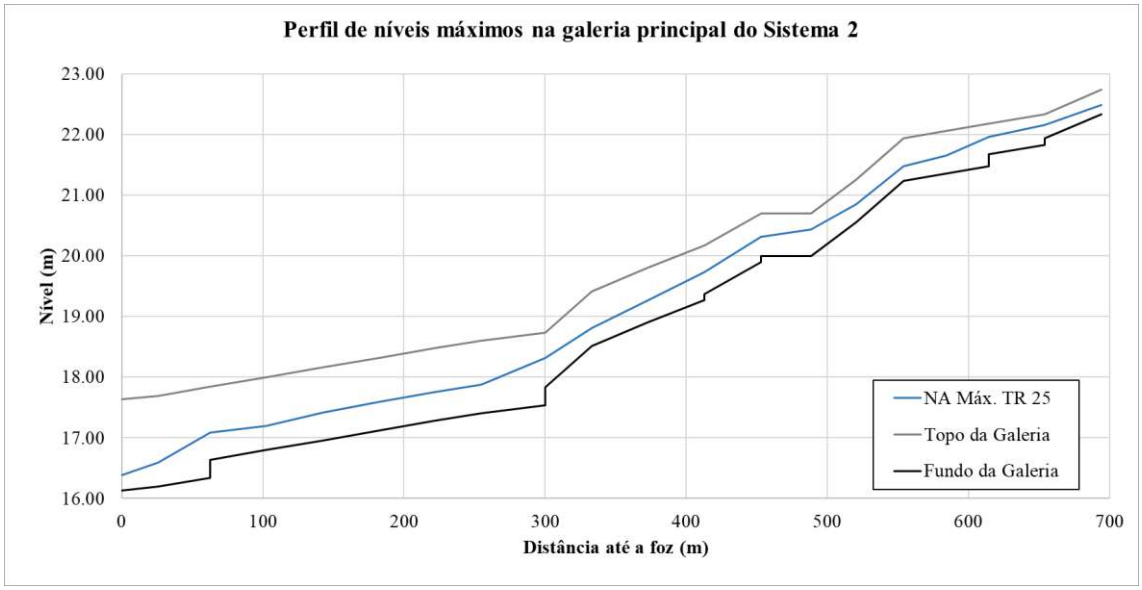

Figura 4-48. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 2 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 25 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria.

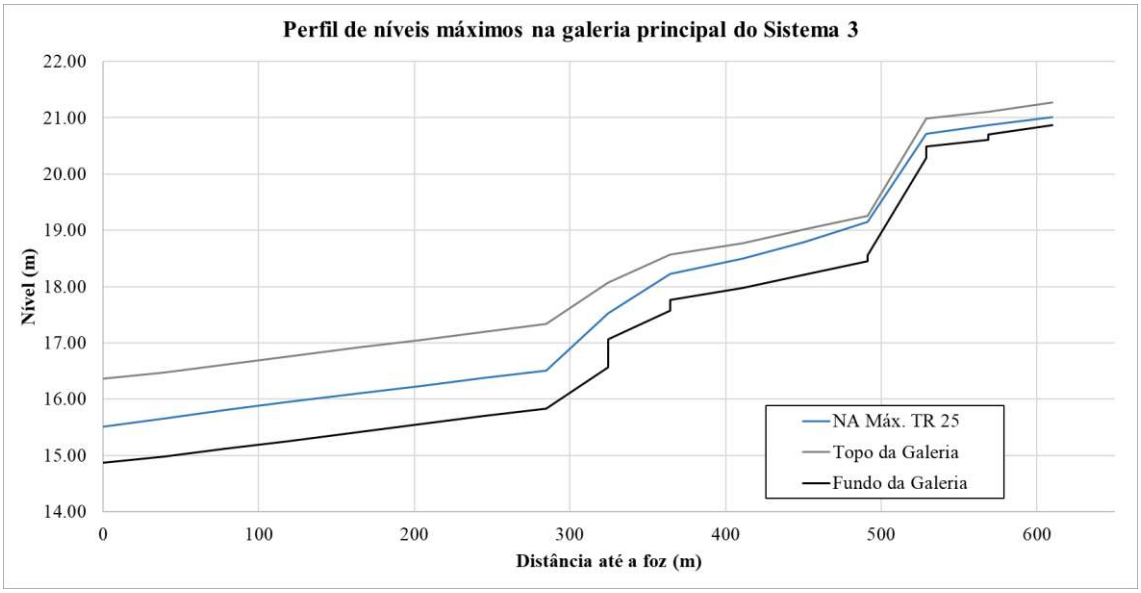

Figura 4-49. Perfil de níveis máximos na galeria principal do sistema 3 de microdrenagem projetado em resposta a um evento de 25 anos de recorrência. Fonte: Elaboração própria.

A implementação de um sistema de microdrenagem alivia os alagamentos observado na sub-bacia para uma configuração de escoamento superficial, porém, aumenta a resposta dos escoamentos superficiais, incrementando as vazões de cheia observadas no corpo hídrico receptor, o rio Prata do Cabuçu. O método tradicional de dimensionar sistemas de drenagem, tende a aumentar as vazões a jusante uma vez que seu principal intuito é a facilitação dos escoamentos locais. As vazões que chegam no rio Prata do Cabuçu contribuintes da sub-bacia estudo de caso para os cenários de falta de rede, e rede de microdrenagem tradicional implementada podem ser vistas na Figura 4-50 para o TR10 e na Figura 4-51 para o TR25.

Os resultados mostram um aumento de mais de 5 vezes a vazão de cheia para a situação de rede de microdrenagem, o que evidencia que a solução local baseada em conceitos tradicionais de drenagem, tende a transferir as inundações para jusante. Para esta situação, o uso de soluções compensatórias, que se aproximem dos padrões de escoamento prévios à implementação da infraestrutura urbana, deve ser buscado.

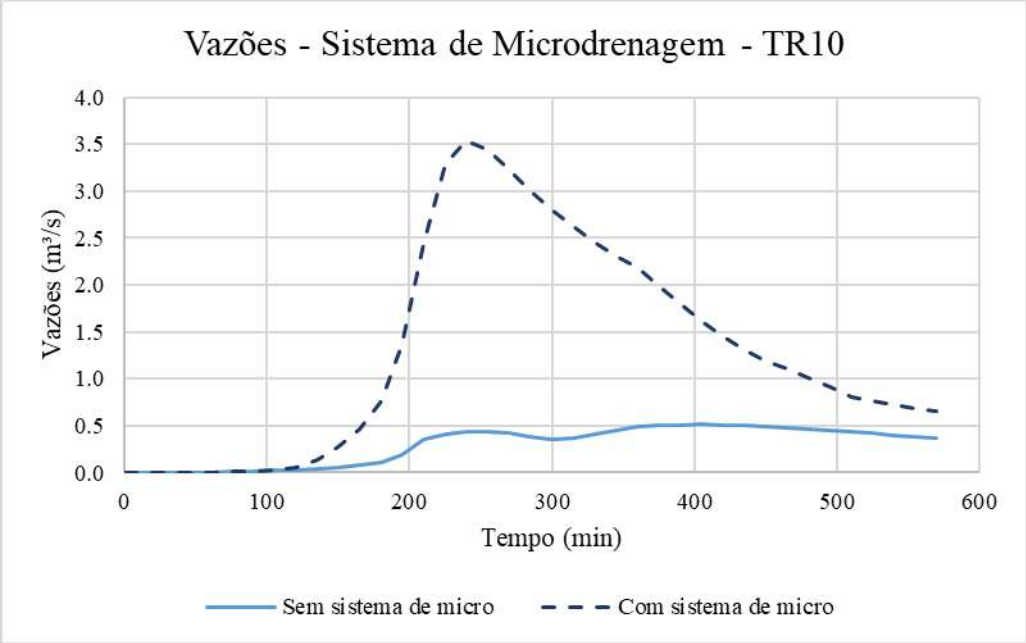

Figura 4-50. Diferença das vazões de contribuição da sub-bacia de estudo no rio Prata do Cabuçu para os cenários com e sem rede de microdrenagem sob um evento de TR10. Fonte: Elaboração própria.

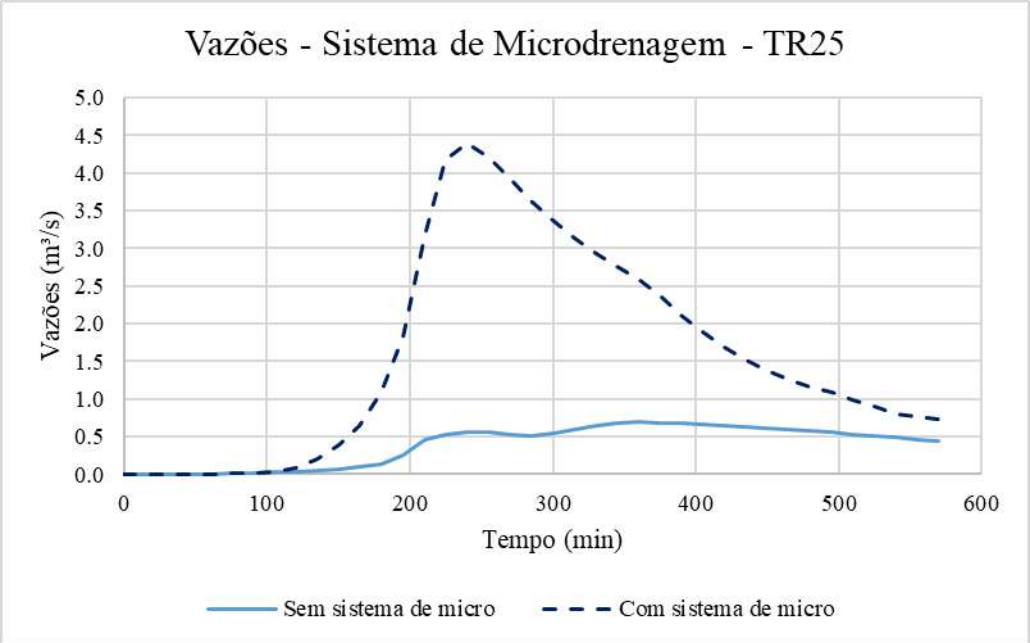

Figura 4-51. Diferença das vazões de contribuição da sub-bacia de estudo no rio Prata do Cabuçu para os cenários com e sem rede de microdrenagem sob um evento de TR25. Fonte: Elaboração própria.

Por último, para verificação do sistema de microdrenagem foi realizada uma simulação considerando a sobre-elevação do nível do rio Prata do Cabuçu.

A Figura 4-52, a Figura 4-53 e a Figura 4-54 apresentam os perfis das galerias dos três sistemas dimensionados. É possível observar que o Sistema 1 teve uma sobre-elevação de nível quando comparado com o cenário sem a consideração da cheia do curso d'água receptor, ficando próximo ao funcionamento sob pressão. O Sistema 3 por sua vez, apresenta a Linha Piezométrica superior ao topo da galeria, o que indica funcionamento sob pressão, que em termos de drenagem urbana significa falha.

Porém, vale destacar que, apesar da falha, não foram observadas manchas de inundação na região de interesse para o TR10 neste cenário. Também não foram observadas manchas de inundação também para a simulação de TR25 conforme apresentado na Figura 4-55.

Os gráficos apresentados na Figura 4-56, Figura 4-57 e Figura 4-58 apresentam os perfis da rede de microdrenagem sob o funcionamento de um evento de TR25. Há poucas alterações entre os TR10 e TR25, elevando os níveis do sistema em cerca de 5 centímetros.

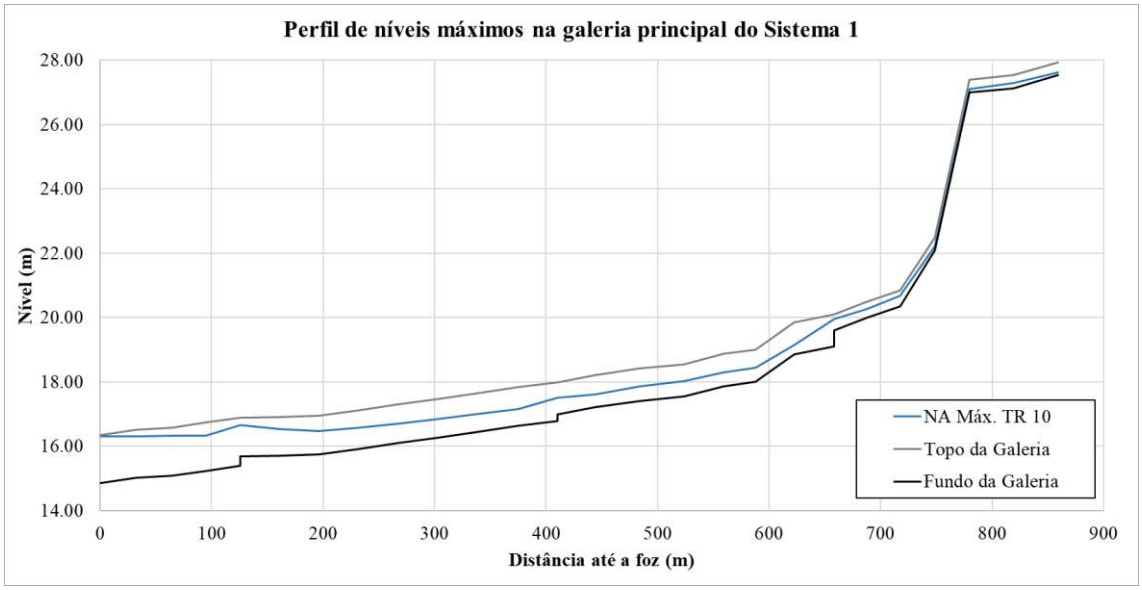

Figura 4-52. Perfil de níveis máximos para a galeria principal do Sistema 1 considerando um evento com TR10. Fonte: Elaboração própria.

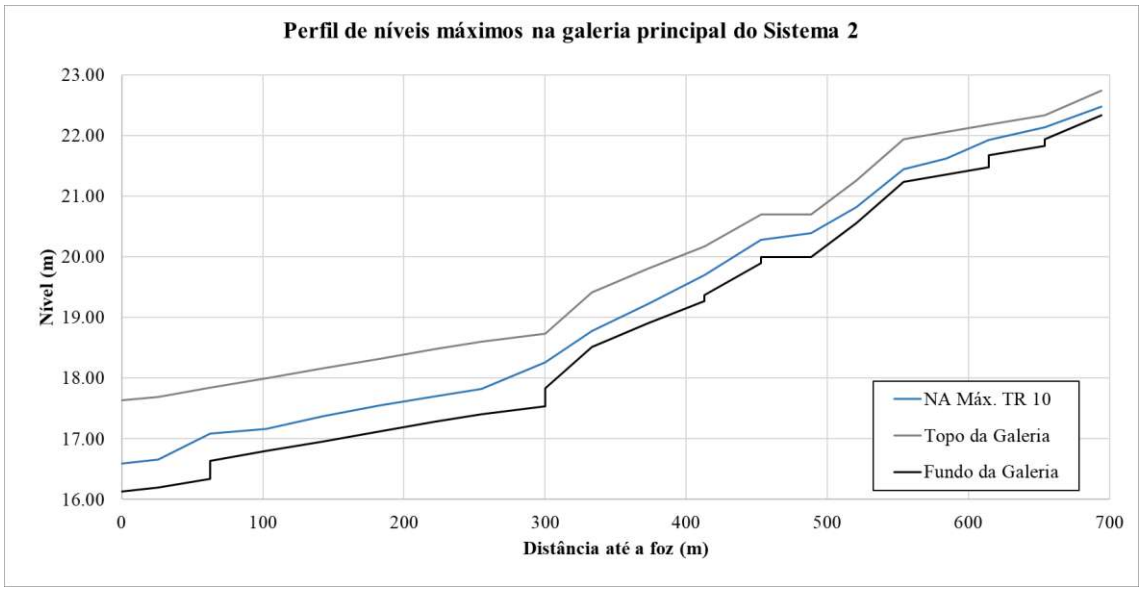

Figura 4-53. Perfil de níveis máximos para a galeria principal do Sistema 2 considerando um evento com TR10. Fonte: Elaboração própria.

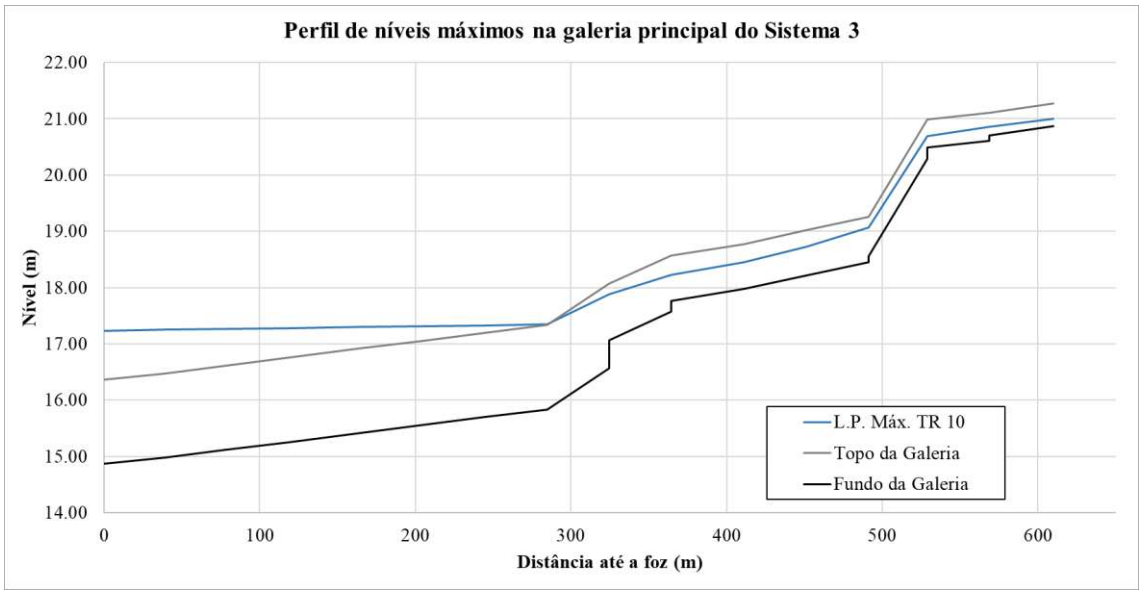

Figura 4-54. Perfil da Linha Piezométrica (L.P.) máxima para a galeria principal do Sistema 3 considerando um evento com TR10, onde é observado o funcionamento sob pressão. Fonte: Elaboração própria.

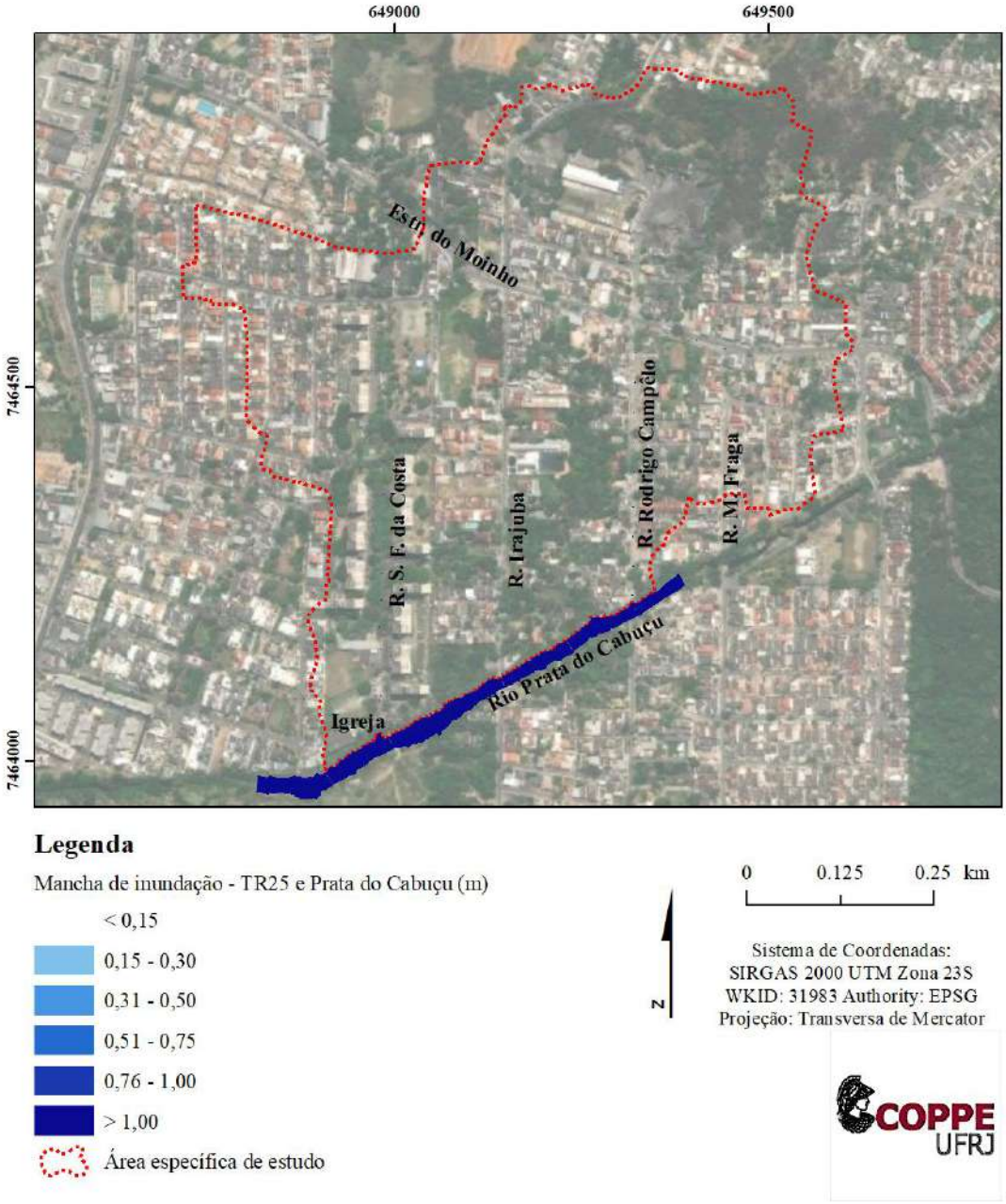

Figura 4-55. Mancha de inundação considerando o sistema de microdrenagem em funcionamento com a cheia do rio Prata do Cabuçu para o TR25. Fonte: Elaboração própria.

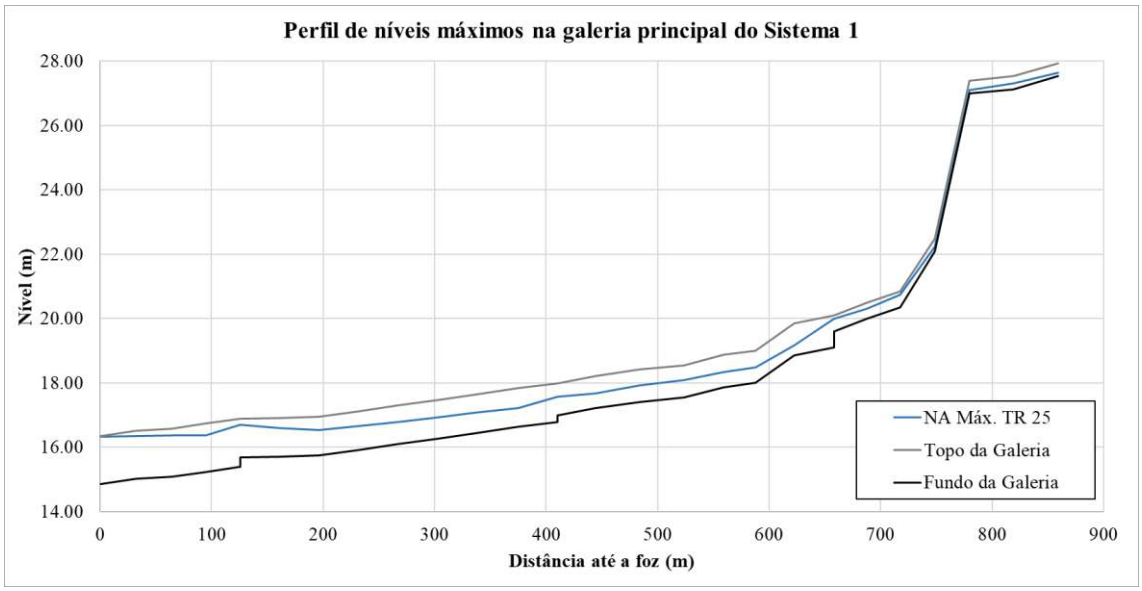

Figura 4-56. Perfil de níveis máximos para a galeria principal do Sistema 1 considerando um evento com TR25. Fonte: Elaboração própria.

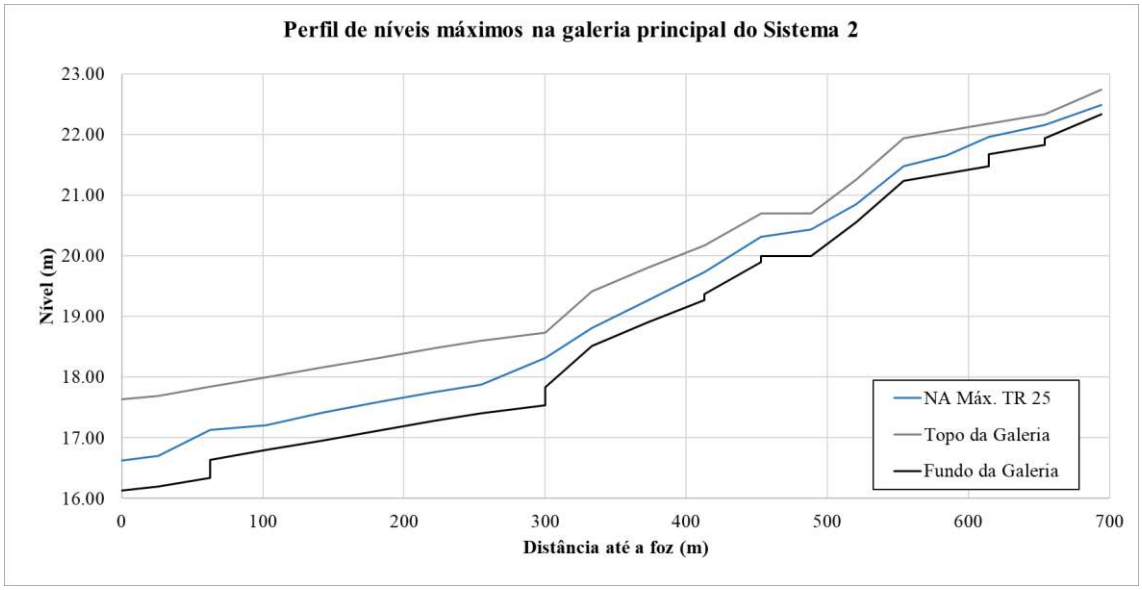

Figura 4-57. Perfil de níveis máximos para a galeria principal do Sistema 2 considerando um evento com TR25. Fonte: Elaboração própria.

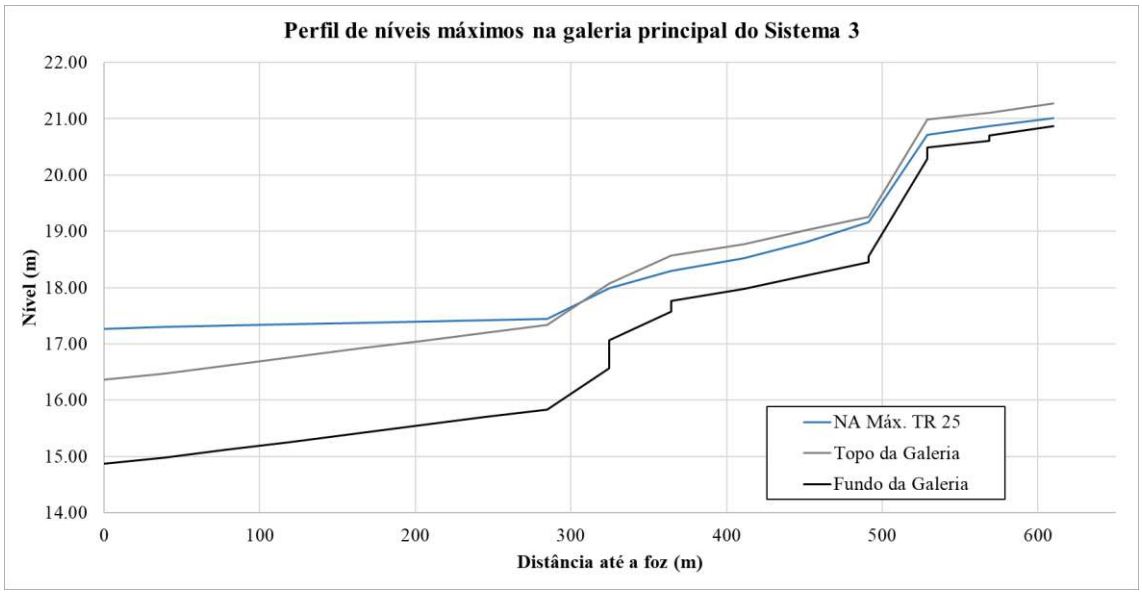

Figura 4-58. Perfil da Linha Piezométrica (L.P.) máxima para a galeria principal do Sistema 3 considerando um evento com TR25. Fonte: Elaboração própria.

4.2.4 Simulação de sistema de esgotamento sanitário

Assim como realizado para a simulação do sistema de microdrenagem, o sistema de esgotamento sanitário parte do dimensionamento clássico das redes de esgoto. O dimensionamento seguiu as premissas apresentadas no capítulo de Revisão Bibliográfica e foi realizado para o Sistema 1 da sub-bacia hidrográfica foco do presente estudo. O dimensionamento seguiu o traçado de redes duplas, posicionadas no passeio.

Utilizando os dados do IBGE apresentados por quadrículas (IBGE, 2010), foi estimada a população do Sistema 1 para início de plano (2021) em 2489 habitantes. Utilizando as projeções populacionais para o município do Rio de Janeiro de maneira conservadora, foi obtida uma população de final de plano de 3087 habitantes (referente ao ano de 2056 que representa o fim da atual concessão de saneamento). Considerando o consumo de 223 L/hab.dia informado pelo SNIS (2021) para o município do Rio de Janeiro, a taxa de retorno padrão de 80% e os coeficientes de consumos horário e diário de 1,5 e 1,2 respectivamente, além de uma taxa de infiltração de 0,1 L/s.km, foi obtida uma vazão total de início de plano de 8,1 L/s e de final de plano de 11,8 L/s.

Para a simulação do modelo hidrodinâmico, foram utilizadas condições de contorno de vazão distribuídas nas diversas singularidades da rede de esgoto, proporcionais aos trechos de contribuição de cada uma. Para a simulação foi considerada a situação de fim de plano que corresponde ao pior cenário para a interação entre os sistemas, visto o maior aporte de esgoto doméstico.

Foram dimensionadas 107 singularidades, cada uma recebendo uma condição de contorno de esgoto. Assim como definido para o sistema de microdrenagem, os PV de esgoto e demais singularidades foram representados por células de escoamento do tipo planície natural. Destas singularidades 38 representam Caixas de Passagem (CP), 50 Poços de Visita (PV) e 19 Terminais de Limpeza (TL). As áreas estimadas para cada singularidade levaram em conta a região de acúmulo de esgoto em planta de cada estrutura, bem como uma parcela de acúmulo na própria tubulação de esgoto.

Foram dimensionados 106 trechos de tubulações de esgoto totalizando 3,54 km, dos quais 89,2% correspondem a tubulações com a diâmetro mínimo de 0,1 m, e 10,8% correspondem a 0,15 m de diâmetro. Os trechos são representados no modelo como

ligações do tipo G2 que representa uma tubulação circular e permite os cálculos de fluxos a superfície livre e sob pressão.

Além disso, foram previstos para o sistema de esgotamento sanitário contribuições por acúmulo de água nas ruas e lotes. Tais comunicações foram realizadas utilizando a ligação de orifício (O1) em dois níveis diferentes. No primeiro nível a água que acumula na célula de rua e que alcança o nível da calçada pode contribuir para o sistema de esgotamento pelas tampas dos PVs. No segundo nível, caso os alagamentos alcancem os lotes, foi prevista outra ligação de orifício que ocorre pelas estruturas do sistema de esgotamento predial, com destaque para as caixas de inspeção, implementadas muitas vezes sem o devido cuidado de seu fechamento. A Figura 4-59 apresenta esquematicamente a possível comunicação do escoamento superficial com o sistema de esgotamento sanitário.

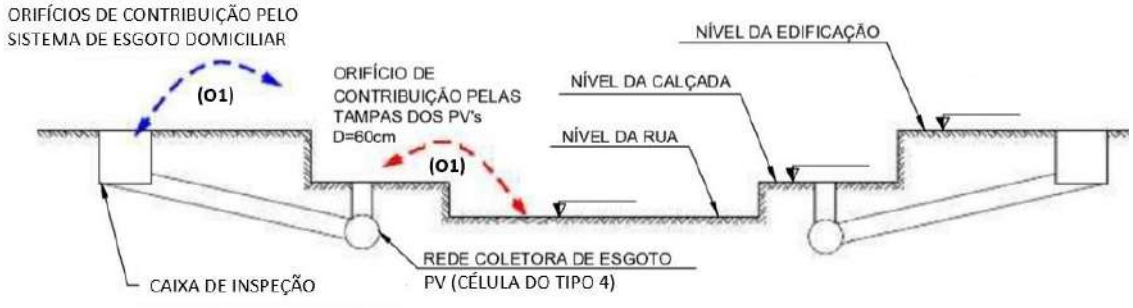

Figura 4-59. Representação esquemática das ligações entre as células de PV de esgoto, ruas e lotes. Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente para o exutório do Sistema 1 de esgotamento sanitário foi prevista uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) compacta localizada em uma área livre próxima ao rio Prata do Cabuçu.

A Figura 4-60 apresenta o traçado da rede de esgotamento sanitário proposta para o Sistema 1. A figura apresenta também a localização da ETE compacta, que configura o exutório do sistema.

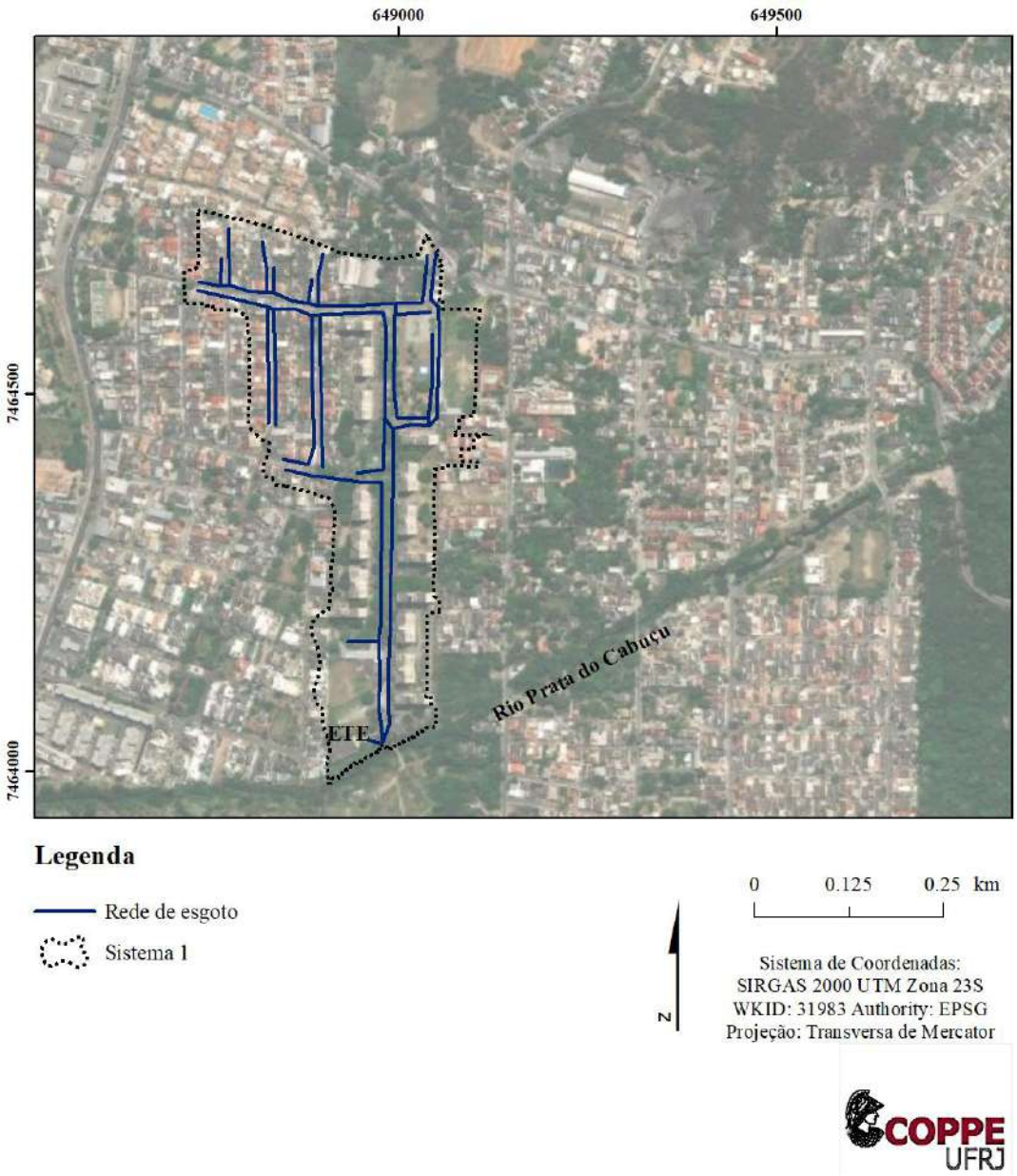

Figura 4-60. Traçado da rede de esgotamento sanitário, dupla e posicionadas no passeio proposta para o Sistema 1. Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente foi realizada uma simulação considerando exclusivamente a demanda do sistema de esgotamento sanitário, ou seja, um cenário sem chuva e sem elevação do nível do rio Prata do Cabuçu. Os resultados obtidos confirmam o funcionamento adequado da rede previsto na etapa de dimensionamento e permitem validar o uso de um modelo hidrodinâmico *Quaisi-2D* baseado em células de escoamento para simulação do sistema de esgotamento sanitário.

A Figura 4-61 apresenta o preenchimento das redes de esgoto nas diversas células de escoamento simuladas. Conforme verificado no gráfico, o uso de diâmetro mínimo faz com que grande parte das redes de esgotamento sanitário esteja trabalhando com folga, considerando exclusivamente o aporte de esgoto. Não foram verificadas na simulação tubulações com preenchimentos maiores que 75% conforme estabelecido por norma.

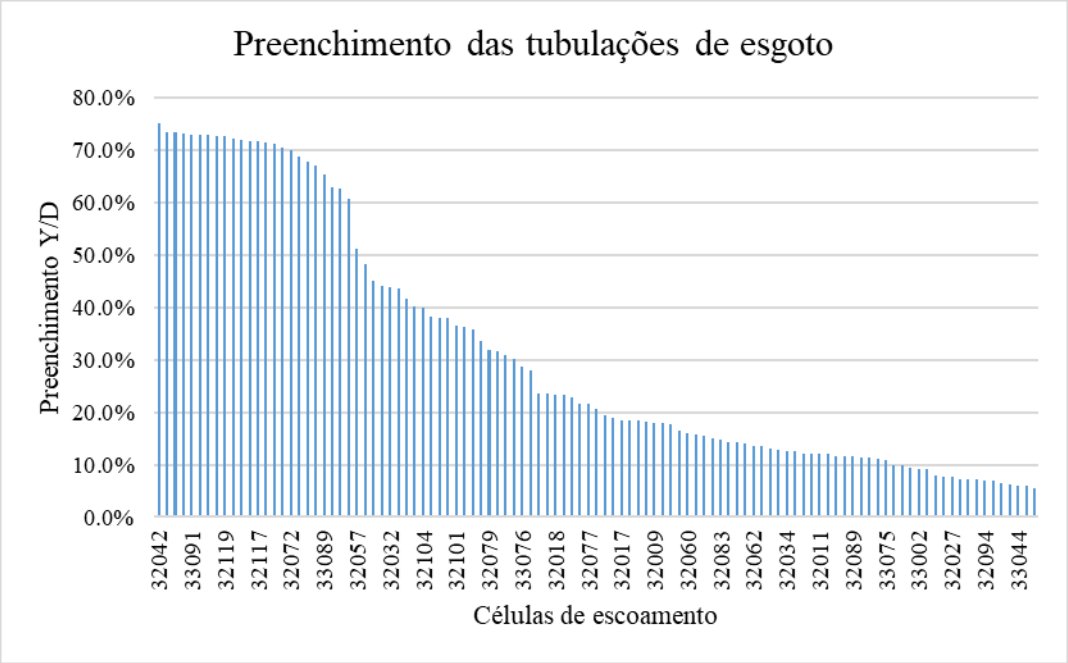

Figura 4-61. Resultados da simulação hidrodinâmica para a rede de esgotamento sanitário.
Fonte: Elaboração própria.

Outra verificação necessária para este cenário de simulação se trata da verificação das vazões de contribuição à ETE. É esperada uma contribuição de 11,8 L/s ou 0,0118m³/s no exutório do sistema de esgoto. A Figura 4-62 apresenta os resultados de simulação na qual é possível ver que a vazão se estabiliza exatamente na vazão prevista para o sistema. Vale destacar que o modelo foi simulado com partida fria, quer dizer, com condições iniciais não representativas, considerando o sistema de esgoto vazio. Dessa maneira a simulação leva cerca de 150 minutos ou 10 intervalos de tempo de 15 minutos para estabilizar na vazão de fim de projeto.

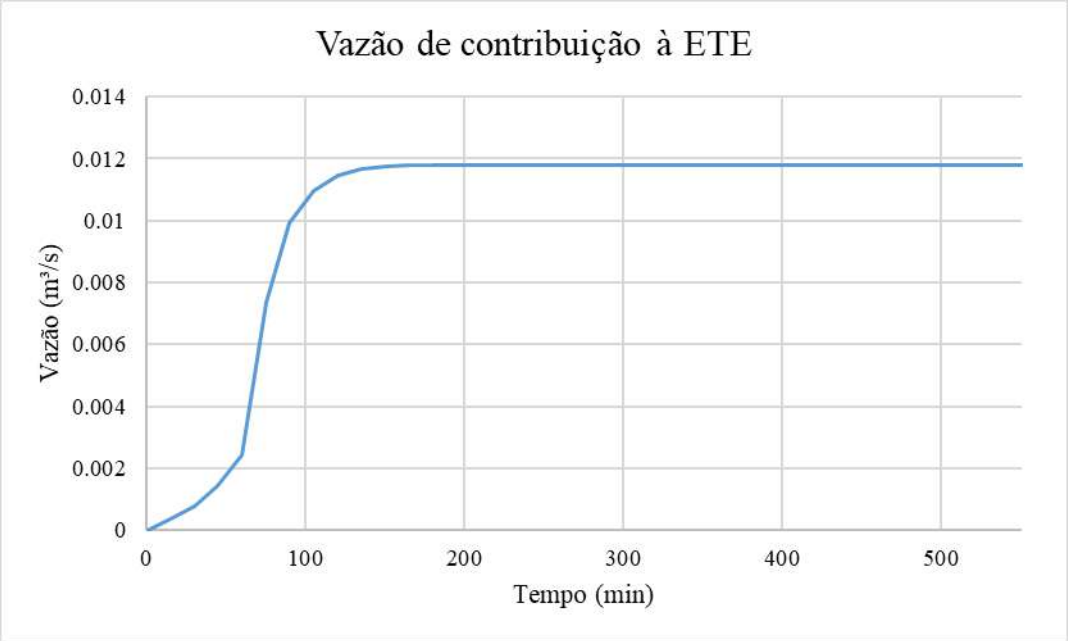

Figura 4-62. Vazão de contribuição à ETE para a simulação exclusiva do funcionamento do sistema de esgotamento sanitário, modelo em partida fria. Fonte: Elaboração própria.

4.2.5 Possíveis interações entre os sistemas

Como evidenciado no início do tópico 4.1, no qual é realizado um diagnóstico preliminar da região, o dimensionamento realizado para os sistemas de microdrenagem e de esgotamento sanitário não representam a realidade local. As etapas anteriormente apresentadas serviram para consolidar, em uma só base de simulação as diversas camadas das águas urbanas estudadas, porém, é a partir deste ponto que serão exploradas as interações forçando falhas nas redes dimensionadas, aproximando-se da realidade dos sistemas de saneamento brasileiros.

Cabe ressaltar que não é procurado o real funcionamento dos sistemas da área de estudo, mas sim explorar e simular as diversas configurações de interação, consolidando a metodologia. Um caso real será aplicado no tópico 4.2 a partir da metodologia ordenada na presente sub-bacia de estudo locada na bacia hidrográfica dos rios Piraquê-Cabuçu.

4.2.5.1 Falha completa ou ausência do sistema de microdrenagem

Para este cenário foi considerado que o sistema de microdrenagem está completamente colapsado por falta de manutenção, por exemplo. Este cenário também configura uma situação na qual a drenagem urbana é realizada somente por estruturas superficiais como sarjeta e meio-fio, ou pelos próprios logradouros.

Porém, mesmo que sem sistema de microdrenagem implementado, foi simulado o funcionamento de um sistema de esgotamento diante desta realidade. Esta simulação também configura uma realidade na qual o sistema de esgotamento sanitário é implementado antes do sistema de drenagem.

Os resultados desta simulação podem ser vistos na Figura 4-63 e na Figura 4-64 em manchas de inundação considerando um evento de precipitação intensa com 10 anos e 25 anos de recorrência, respectivamente. As figuras comparam os resultados de uma situação sem sistema de esgoto, apenas drenagem superficial, com o cenário presente proposto.

É possível verificar que a implementação da rede de esgoto auxilia a drenar parte dos alagamentos na região norte da bacia, onde há depressões topográficas no território. Isto corrobora com o apresentado por Coelho (2020) para a realidade do Rio de Janeiro, que cita que a população em áreas carentes costuma utilizar o sistema de esgoto para drenar as inundações, abrindo os tampões dos PVs de esgotos. Porém, esta prática não é

necessária para que os alagamentos contribuam para o sistema de esgoto, uma vez que o acúmulo de água nos logradouros acima dos tampões dos PVs de esgoto já possibilita a interação entre os sistemas. Após os níveis de alagamentos superarem os níveis das casas também é esperada a contribuição das águas pluviais pelas caixas de inspeção, muitas vezes implementadas de maneira improvisada por pessoas não capacitadas.

Porém, a contribuição da drenagem pluvial nestas áreas sobrecarrega o sistema de esgotamento sanitário, dimensionado para vazões de outras ordens de grandeza. As redes de esgoto foram dimensionadas para diâmetros de 0,10 m a 0,15 m, enquanto para as redes de drenagem os diâmetros das galerias dimensionadas chegam a 1,5m, 10 vezes maior em alguns casos. Isto ocasiona que o sistema funcione sob pressão em diversos trechos e passe a extravasar em outras regiões, que antes não apresentavam acúmulo de água, como visto mais intensamente na área central da bacia do Sistema 1. Vale destacar que este acúmulo de água é uma mistura das águas pluviais e esgotos domésticos apresentando graves problemas para a saúde humana devido às doenças de veiculação hídrica.

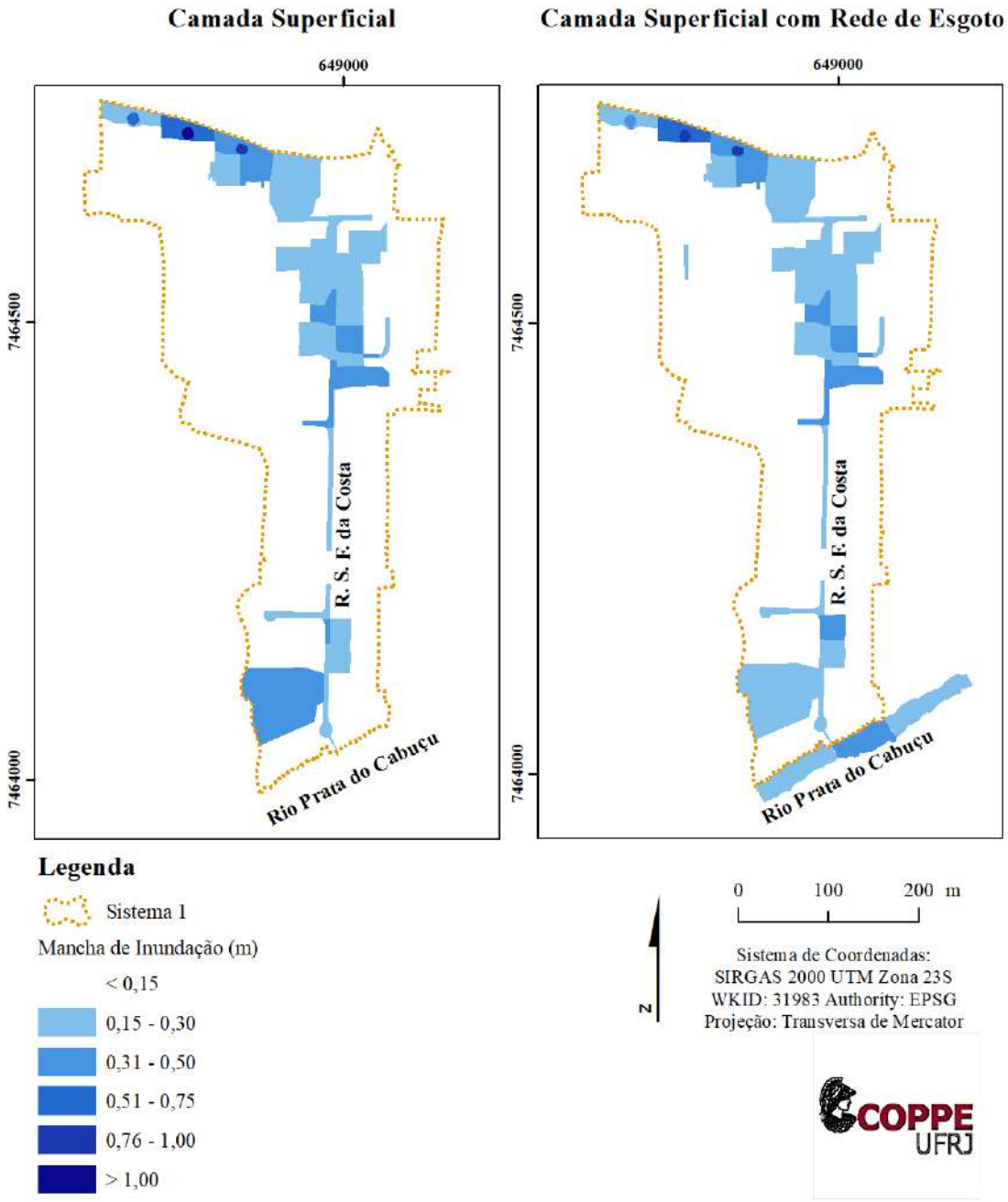

Figura 4-63. Resultados da simulação para TR10 considerando a camada superficial de drenagem e um sistema de esgotamento implementado para o Sistema 1 da sub-bacia de interesse. Fonte: Elaboração própria.

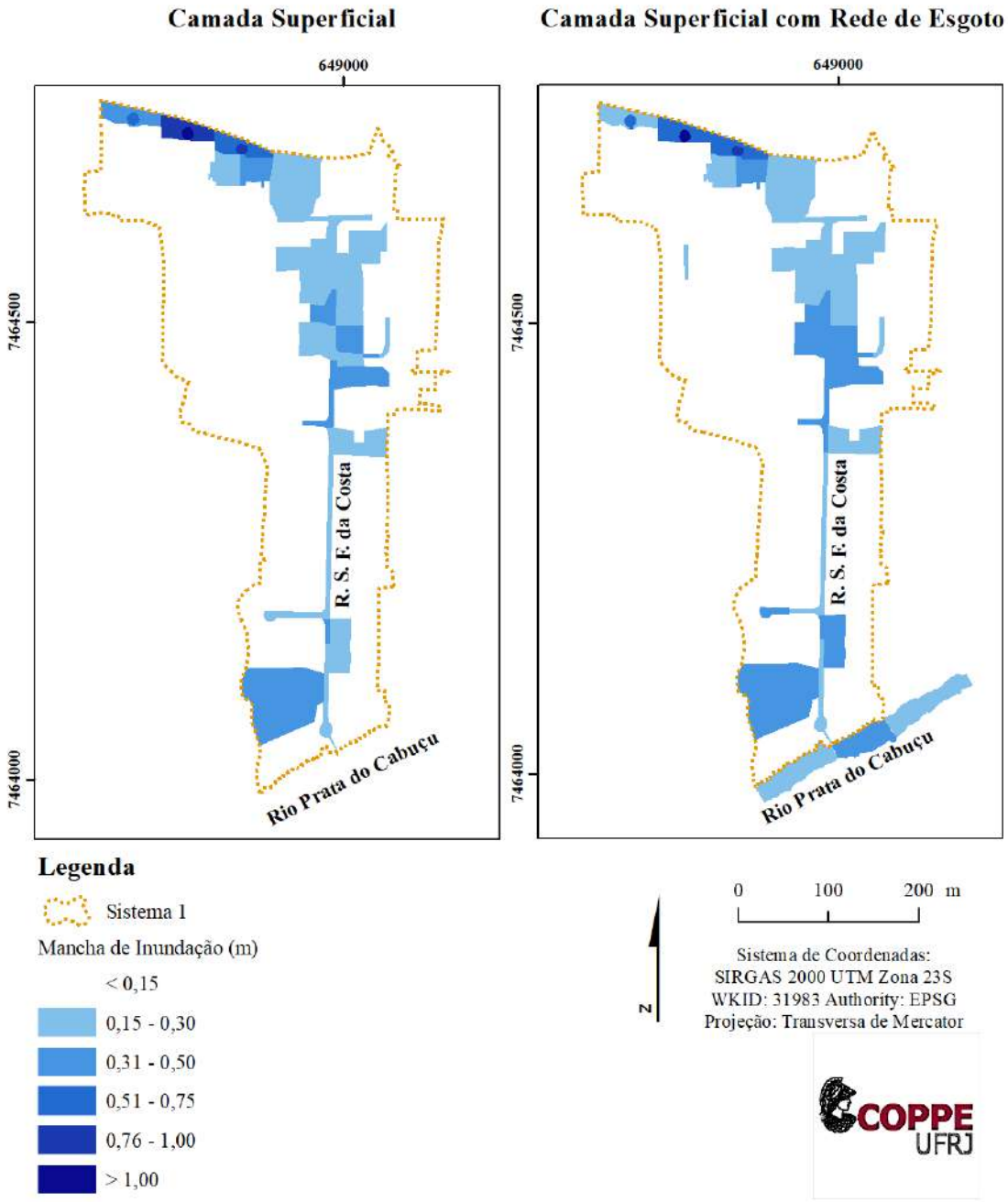

Figura 4-64. Resultados da simulação para TR25 considerando a camada superficial de drenagem e um sistema de esgotamento implementado para o Sistema 1 da sub-bacia de interesse. Fonte: Elaboração própria.

Outro resultado importante desta simulação está na análise das vazões afluentes à ETE. Estações de tratamento, bem como estações elevatórias de esgoto (EEE) são dimensionadas para receber uma contribuição de esgoto e uma parcela de contribuição de águas de infiltração advindas do subsolo, conforme estabelecido pela NBR9649 da ABNT (1986b). A contribuição de águas pluviais pode afetar o tratamento das ETEs diluindo os esgotos contribuintes, ou, para situações mais extremas, aportar com vazões tão elevadas

que podem colapsar as estruturas de ETEs e EEEs. Dimensionar estruturas de vertimento pode mitigar os problemas de aporte excessivos de água na rede de esgoto em períodos de chuva, mas não resolve o problema de origem, além das estruturas de vertimento estarem associadas a contribuições aos corpos hídricos receptores, e dessa forma, geram impactos negativos ao meio ambiente.

Os cenários simulados para falha completa da rede de microdrenagem, ou para sua inexistência geram contribuições de águas pluviais na rede de esgotamento e ocasionam um aumento da vazão afluente à ETE, conforme mostrado no gráfico da Figura 4-65. É possível ver que a vazão de contribuição à ETE chega a triplicar, apresentando um aumento de 174% para uma chuva de TR10, e um incremento de 208% para a chuva de TR25, em relação ao cenário de tempo seco, para o qual foi dimensionado o sistema de esgoto.

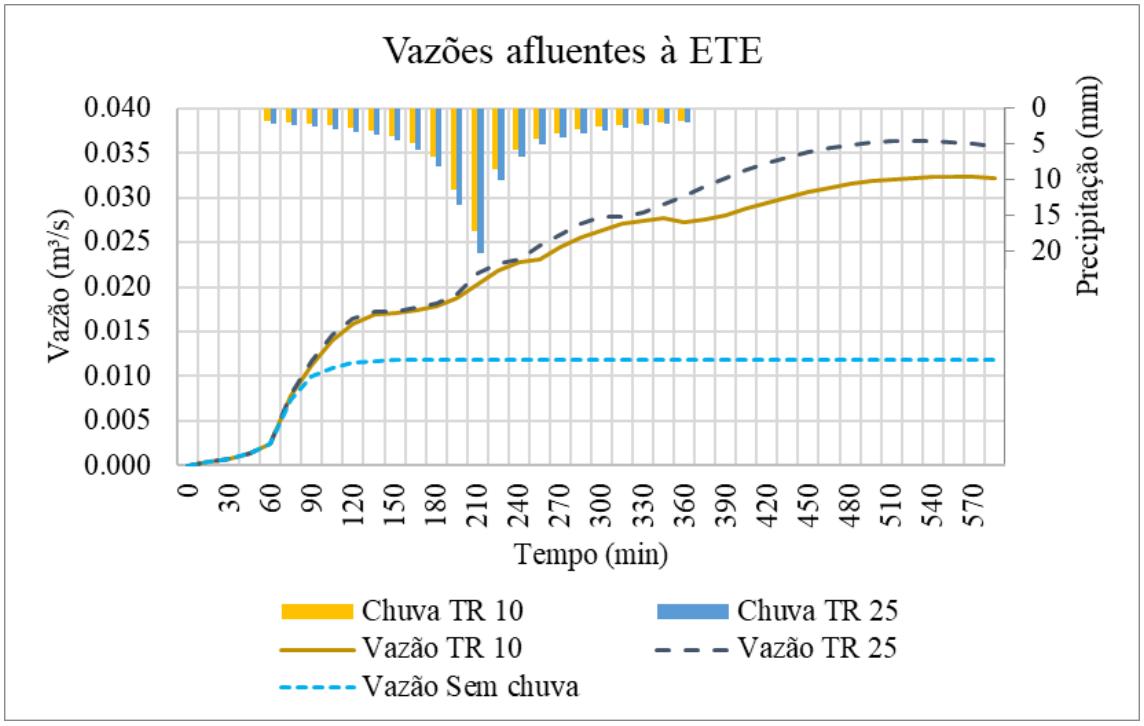

Figura 4-65. Vazões afluentes à ETE considerando o cenário sem rede de microdrenagem para a situação de tempo seco, e para as precipitações de projeto de TR 10 e 25 anos.
Fonte: Elaboração própria.

Por ser um modelo distribuído é possível observar também de maneira espacializada os pontos mais críticos de interação entre os sistemas superficial e de esgoto. Podem ser identificadas as principais singulares do sistema de esgotamento sanitário que apresentam

contribuição de águas pluviais, ou as estruturas nas quais é observado o extravasamento combinado.

Para os eventos de 10 e 25 anos são observadas contribuições de águas pluviais pelos poços de visita, localizados nas calçadas, e pelas caixas de inspeção dos lotes.

A Figura 4-66 e a Figura 4-67 apresentam os poços de visita que recebem aporte dos alagamentos gerados por chuvas de tempo de recorrência de 10 e 25 anos, respectivamente. Podem ser observados diversos pontos de contribuição, principalmente na região norte, já identificada como área crítica do Sistema 1.

A Figura 4-68 apresenta os pontos da rede de esgoto que possuem contribuição pelas caixas de inspeção nas edificações para a chuva de projeto de TR 10, enquanto a Figura 4-69 apresenta os resultados para o evento de TR 25. Esta contribuição ocorre no momento que os alagamentos superam os níveis de proteção das edificações, inundando as casas e acessando o sistema de esgotamento sanitário residencial.

A verificação do sentido inverso também pode ser verificada nos resultados da simulação hidrodinâmica. A Figura 4-70 e a Figura 4-71 que apresentam as simulações dos TRs 10 e 25 anos, apresentam os poços de visita de esgoto que possuem extravasamento das águas pluviais e de esgoto combinadas. Estas regiões são críticas sob o ponto de vista de dispersão de contaminantes no território urbano.

Porém, a Figura 4-72 e a Figura 4-73 apresentam uma situação mais crítica, nas quais podem ser vistos, para os TRs 10 e 25, os locais onde ocorre o extravasamento combinado no interior de lotes edificados. Nestes locais há exposição direta da população às águas combinadas.

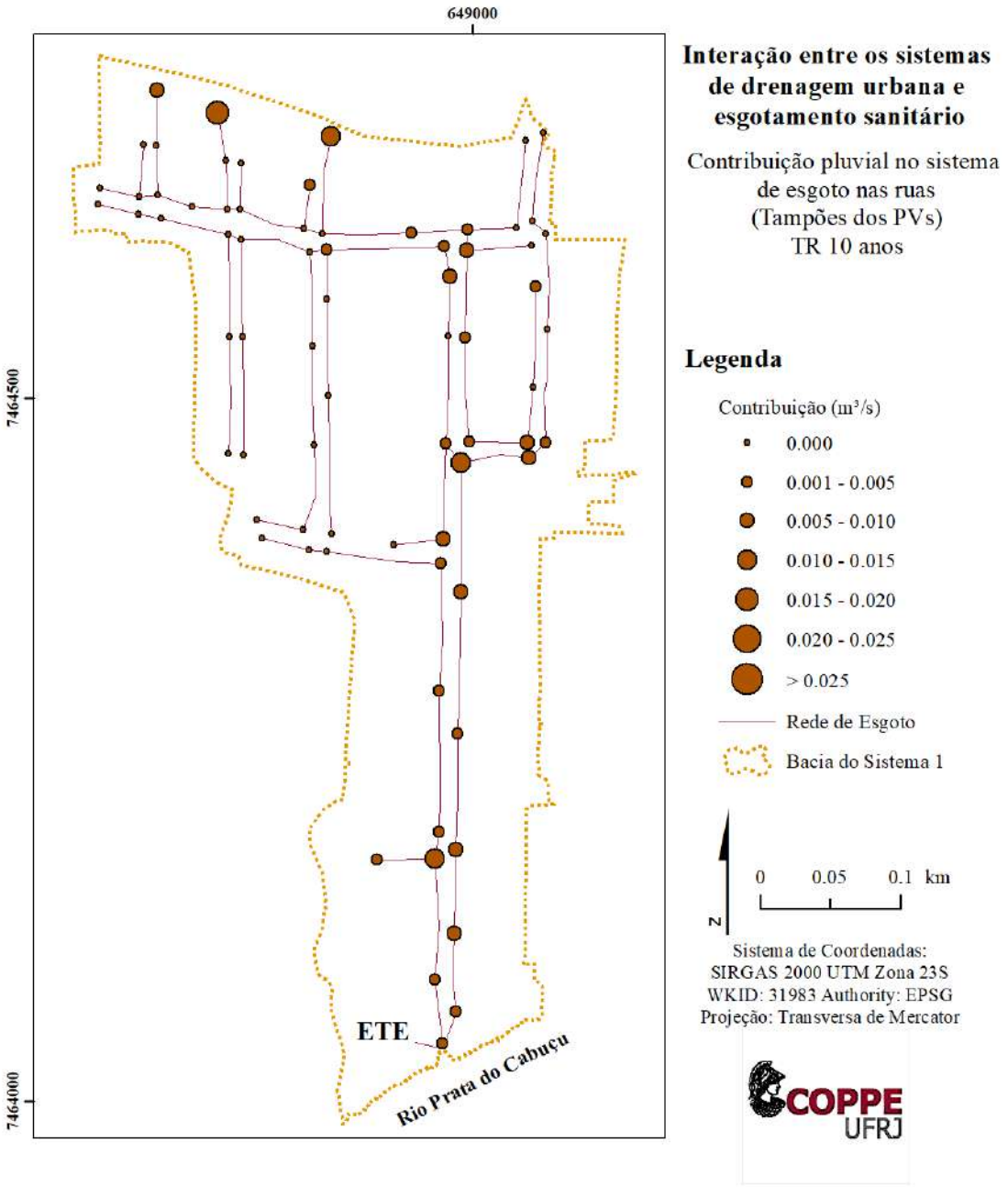

Figura 4-66. Resultados da contribuição pluvial no sistema de esgotamento sanitário pelos tampões dos poços de visita para um evento de TR 10 anos. Fonte: Elaboração própria.

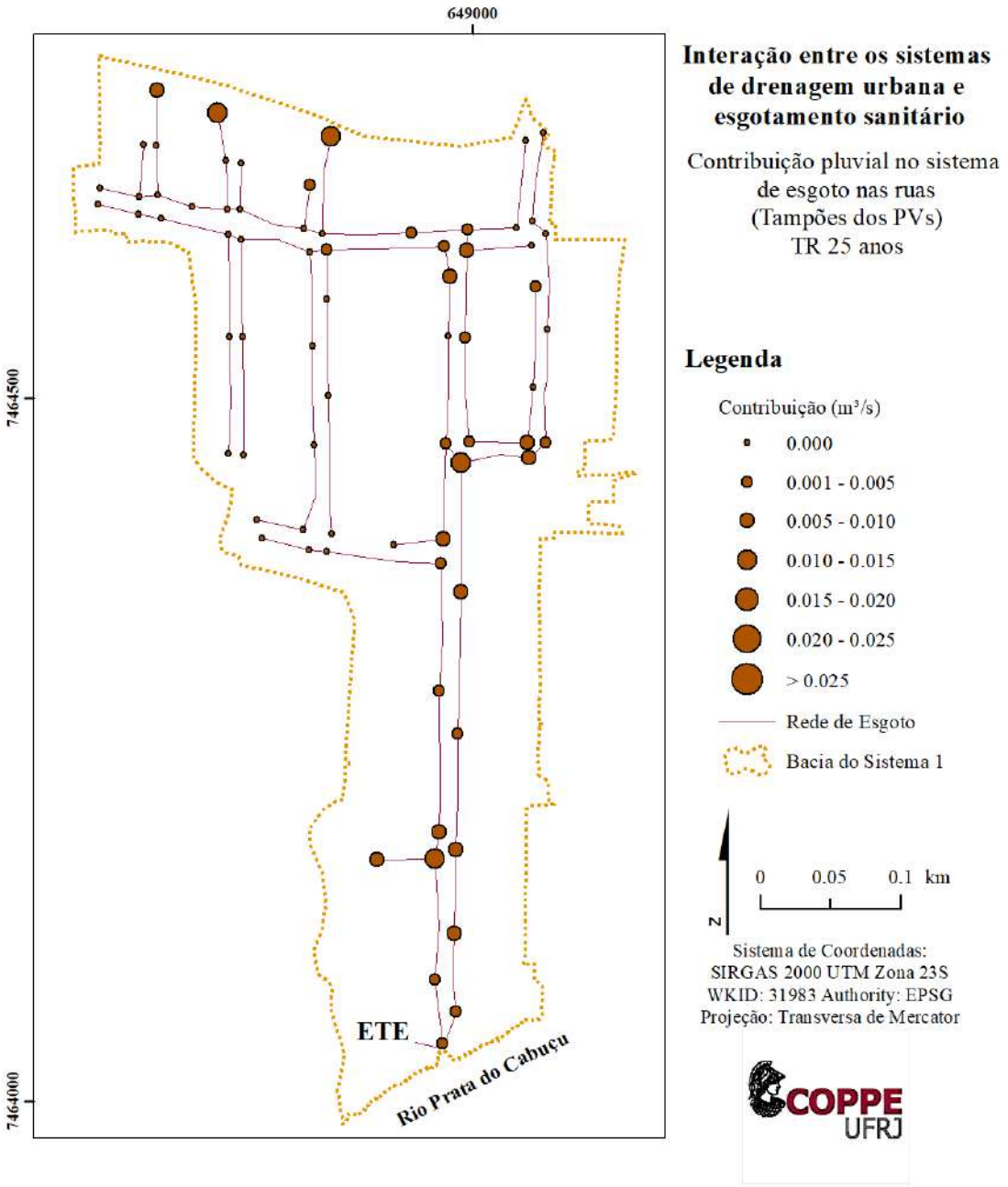

Figura 4-67. Resultados da contribuição pluvial no sistema de esgotamento sanitário pelos tampões dos poços de visita para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria.

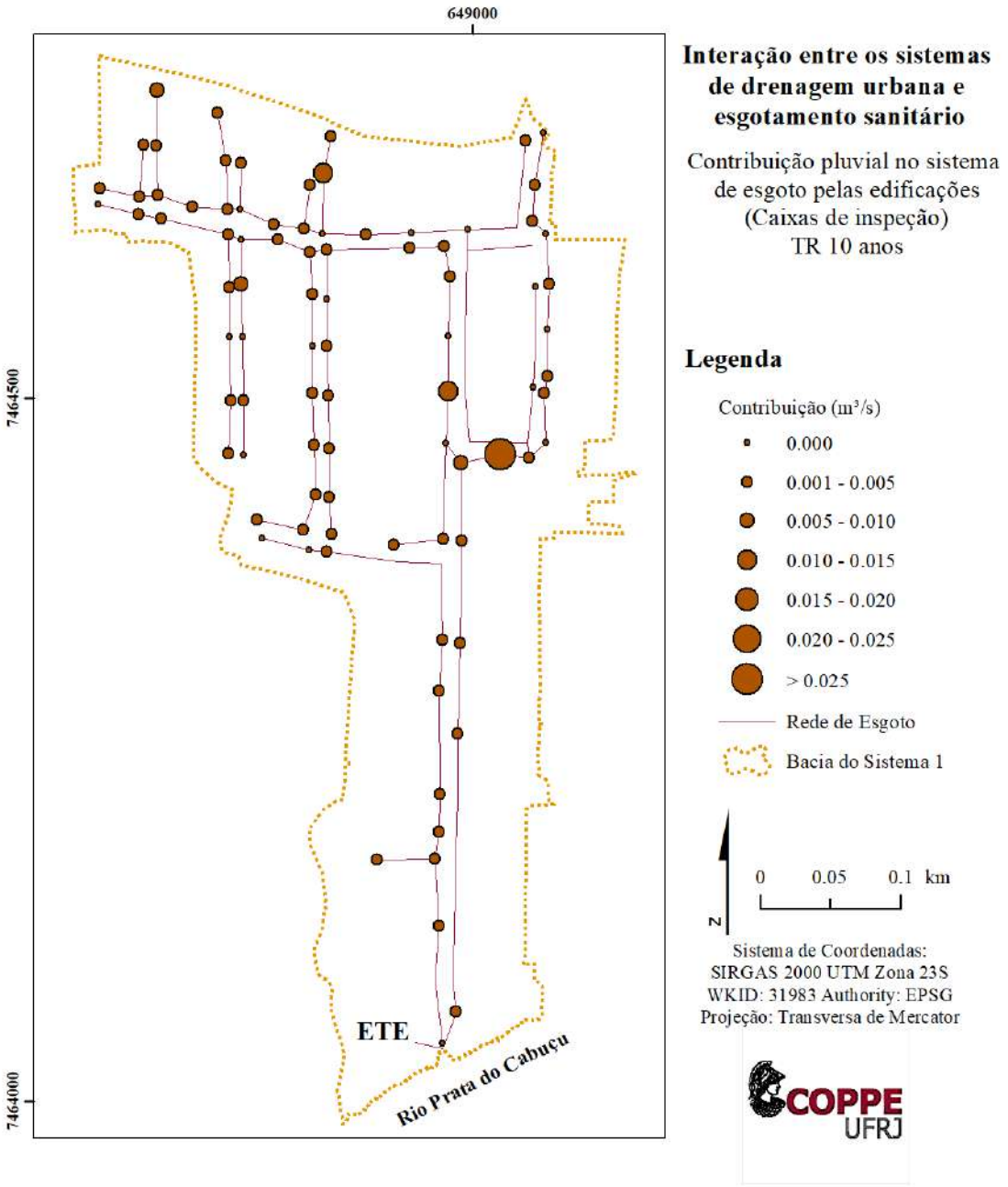

Figura 4-68. Resultados da contribuição pluvial no sistema de esgotamento sanitário pelas caixas de inspeção das edificações para um evento de TR 10 anos. Fonte: Elaboração própria.

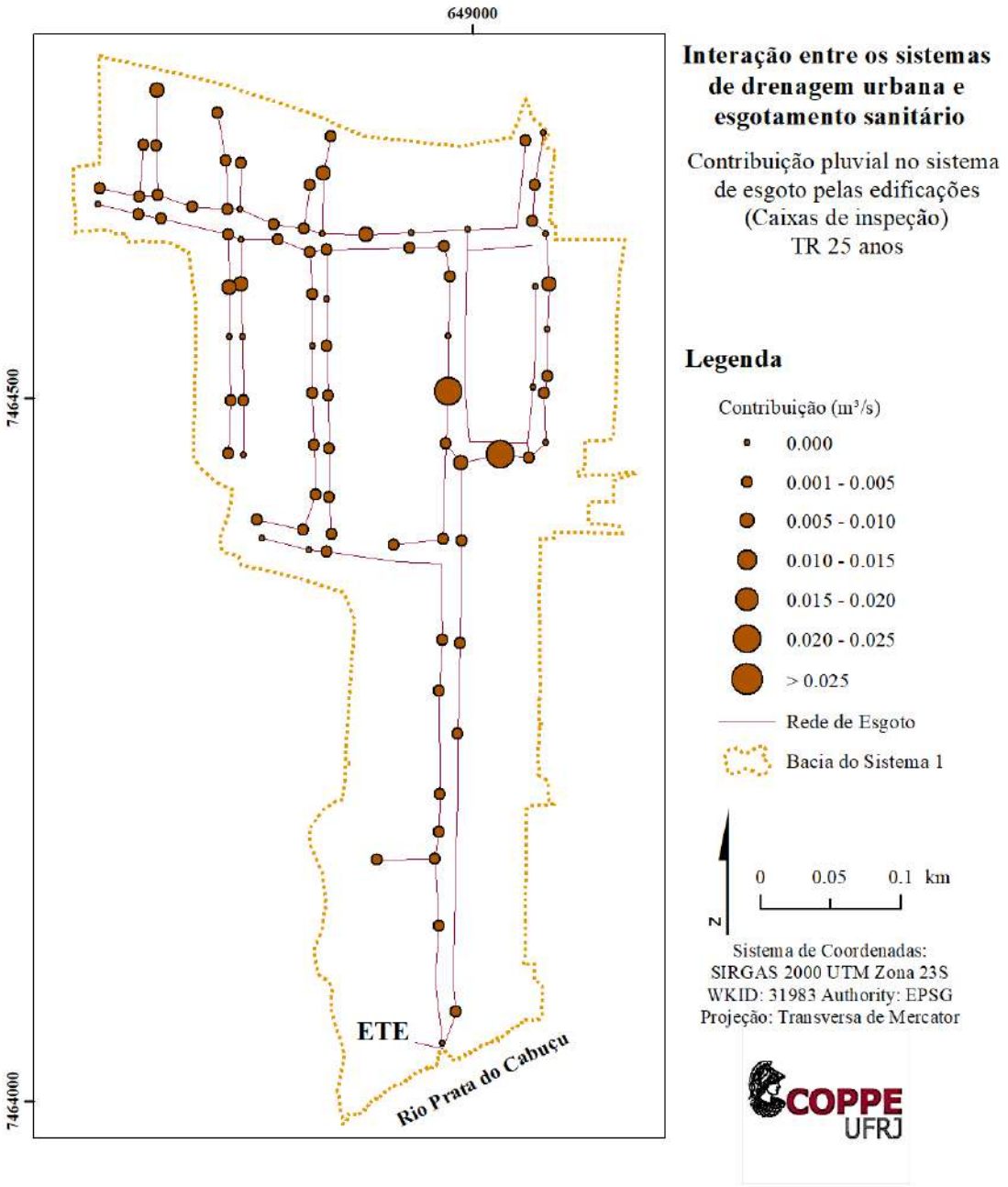

Figura 4-69. Resultados da contribuição pluvial no sistema de esgotamento sanitário pelas caixas de inspeção das edificações para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria.

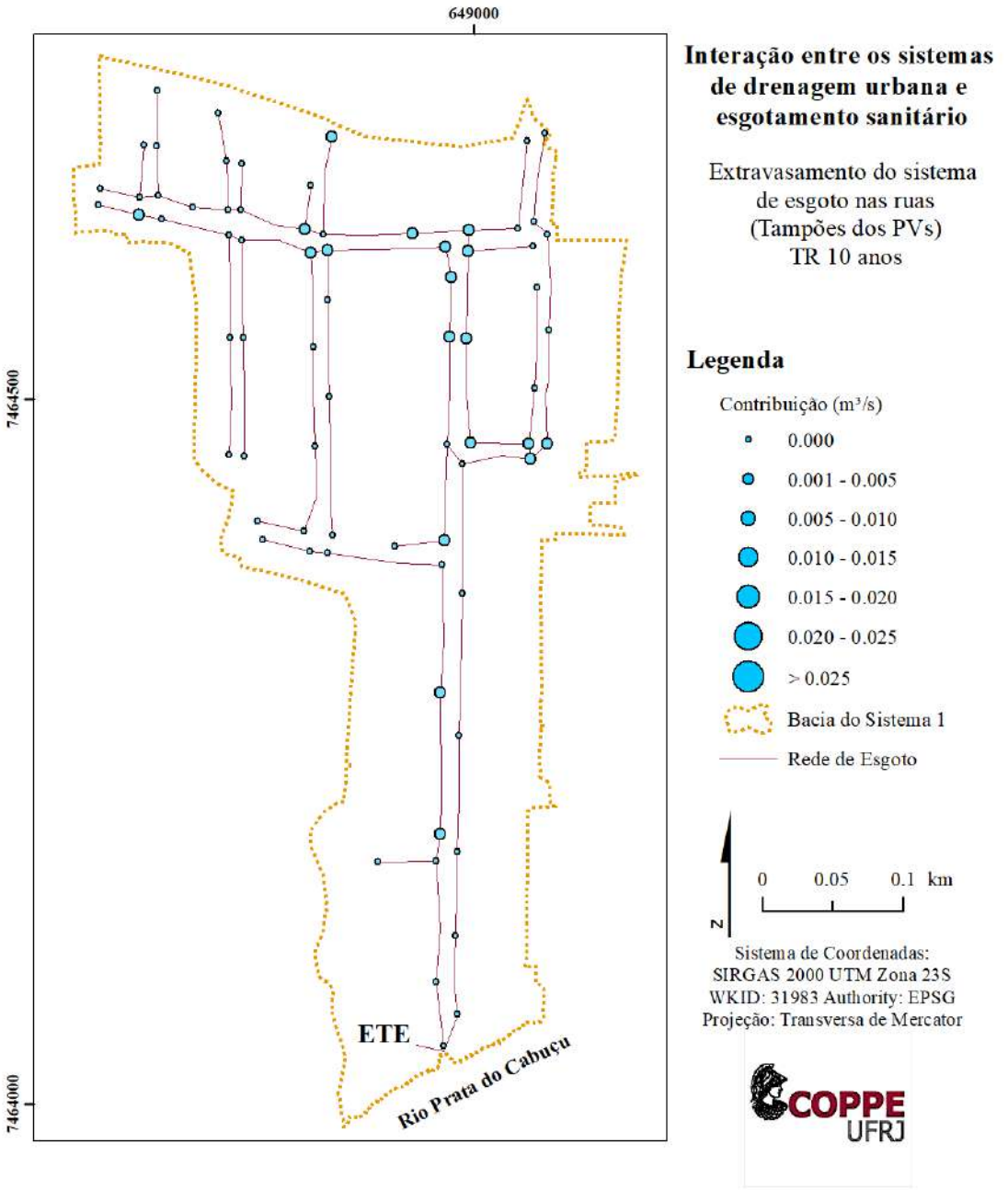

Figura 4-70. Extravasamento do sistema de esgotamento sanitário pelos tampões dos poços de visita para um evento de TR 10 anos. Fonte: Elaboração própria.

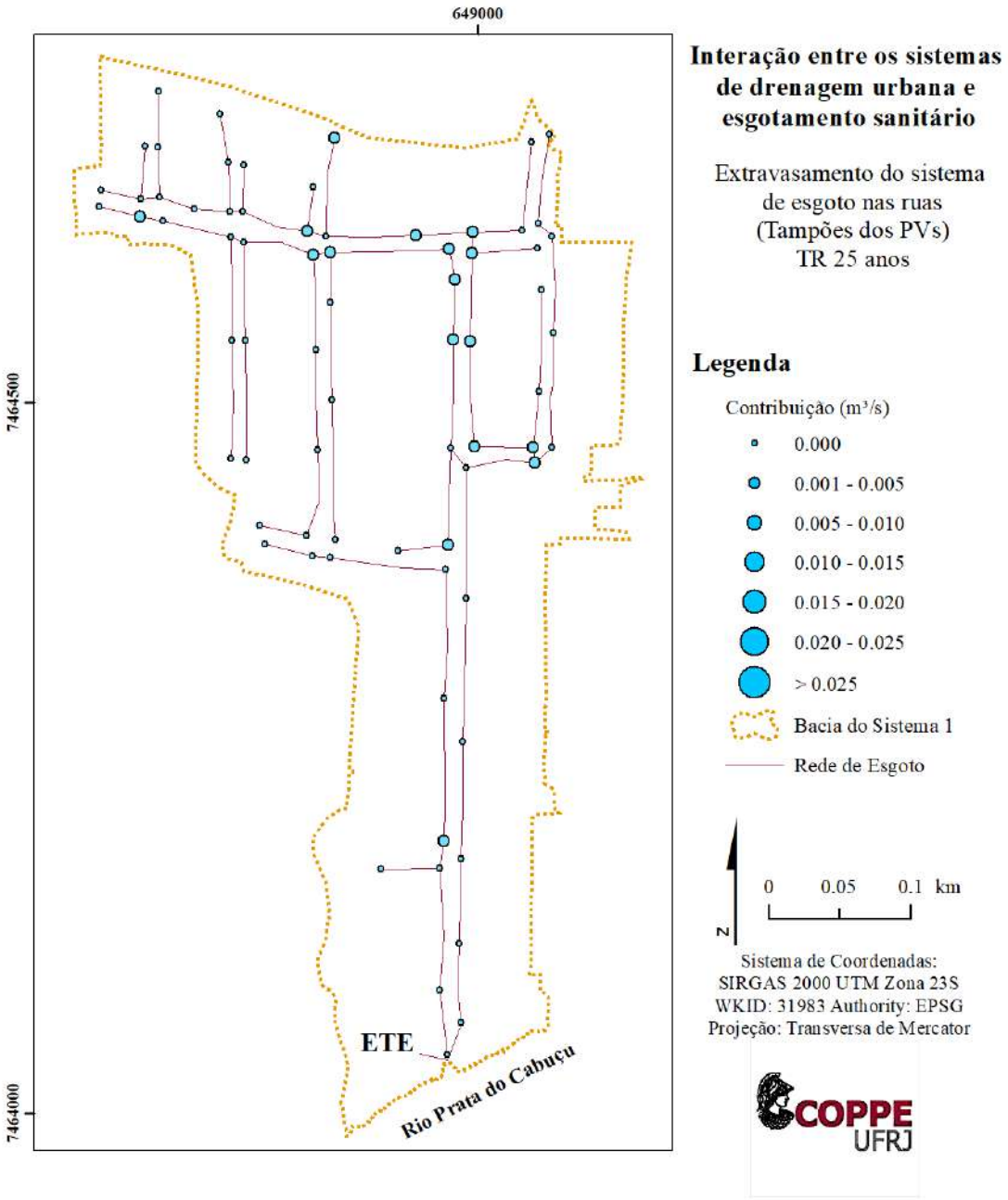

Figura 4-71. Extravasamento do sistema de esgotamento sanitário pelos tampões dos poços de visita para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria.

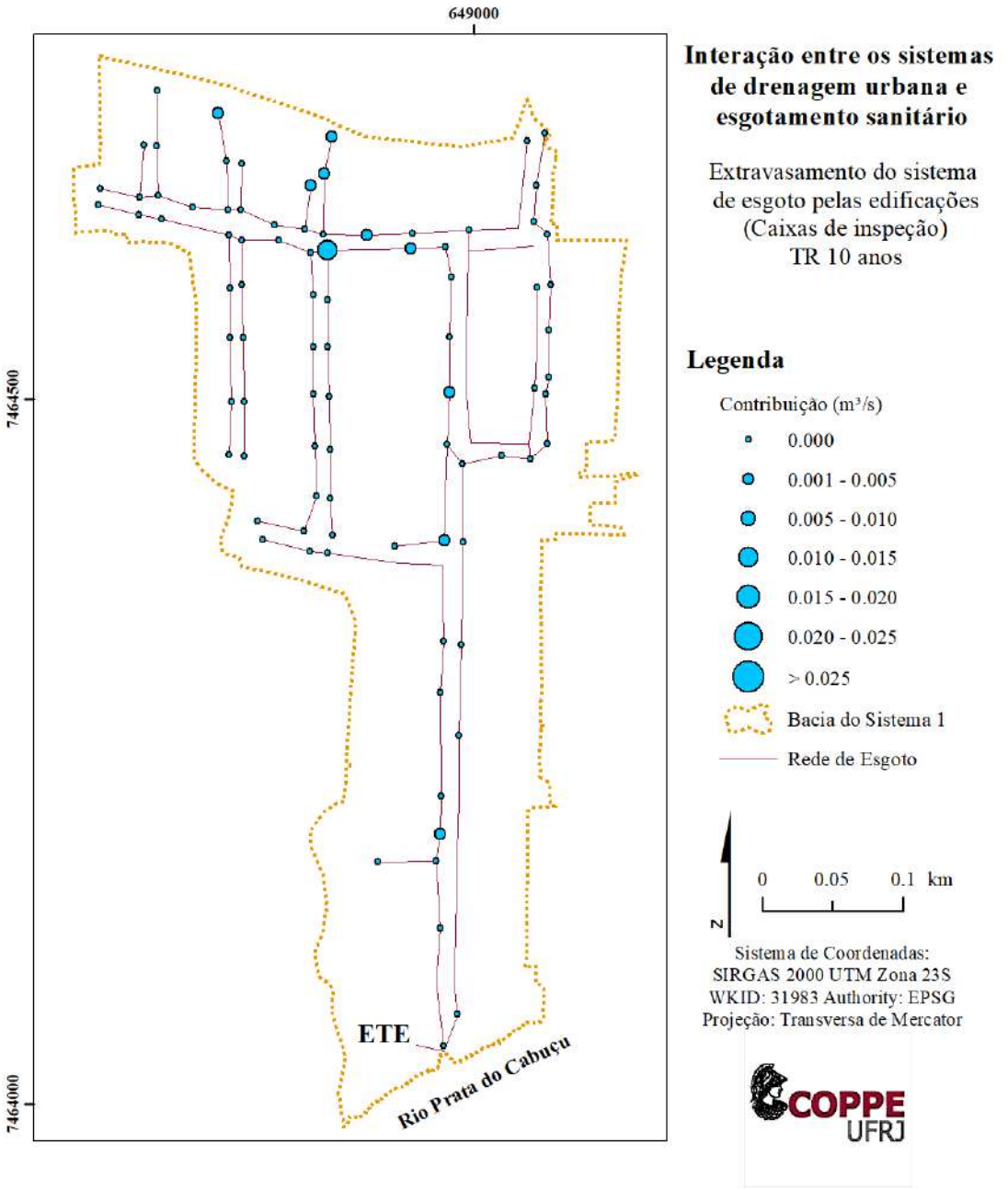

Figura 4-72. Extravasamento do sistema de esgotamento sanitário pelas caixas de inspeção das edificações para um evento de TR 10 anos. Fonte: Elaboração própria.

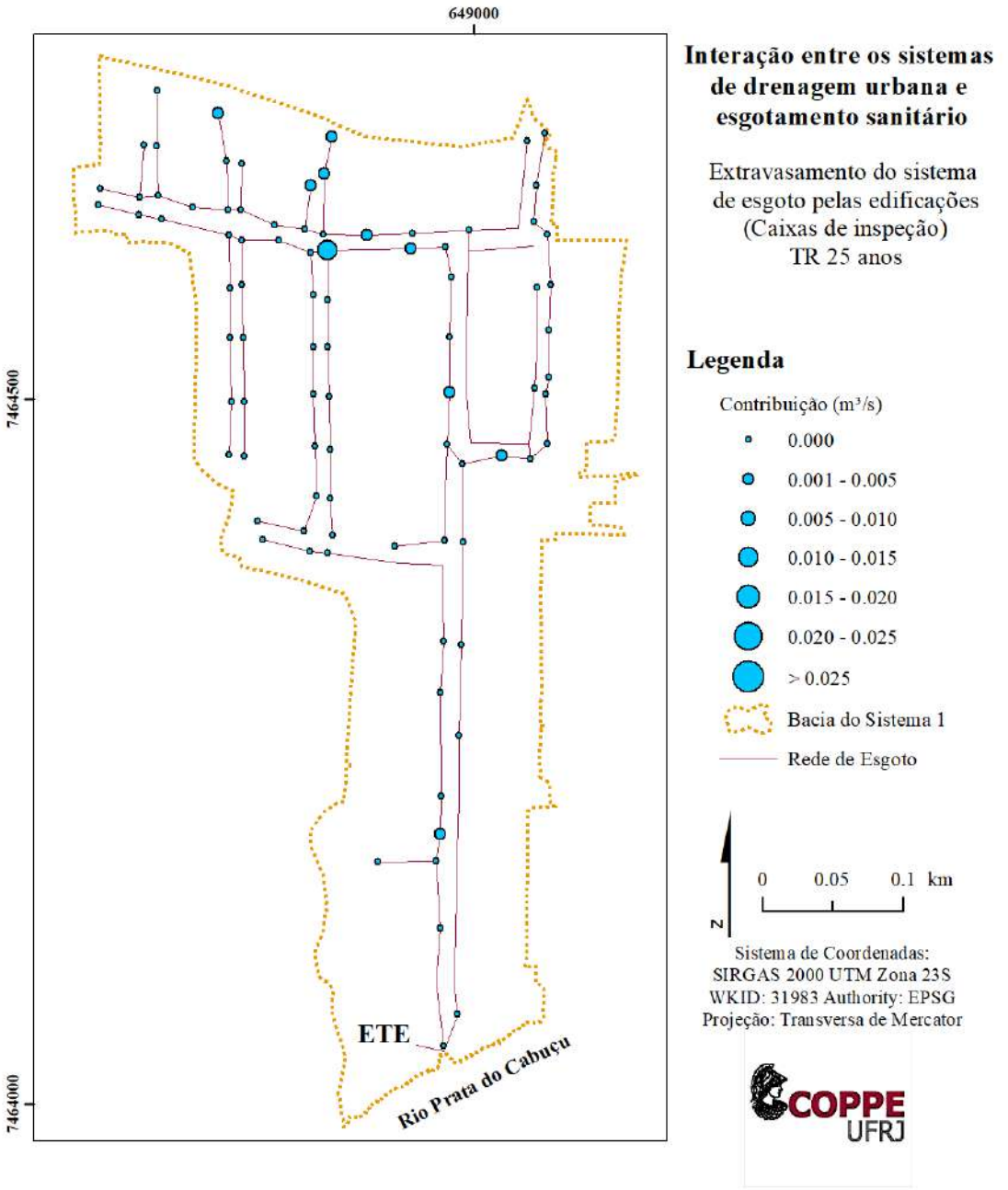

Figura 4-73. Extravasamento do sistema de esgotamento sanitário pelas caixas de inspeção das edificações para um evento de TR 25 anos. Fonte: Elaboração própria.

4.2.5.2 Falta de manutenção do sistema de drenagem

A rotina e os procedimentos de manutenção das estruturas de drenagem urbana existentes devem ser considerados como aspecto fundamental capaz de agravar as enchentes quando não estão devidamente implantadas.

Canais artificiais e outras estruturas de drenagem requerem manutenção regular para sustentar sua capacidade de receber e transportar águas em taxas adequadas, pois as águas de enchentes geralmente carregam sedimentos, detritos, matéria orgânica e outros materiais sólidos que podem reduzir a eficácia dos sistemas de drenagem urbana (Chow, 1959).

Para este cenário, o estado de manutenção do sistema de drenagem está sendo representado pelas condições de limpeza e assoreamento dos principais rios e canais da área de estudo. Um aumento do coeficiente de Manning nos principais cursos d'água foi adotado para representar a degradação das condições de manutenção do sistema de drenagem urbana – esse aumento é baseado em Chow (1959), em um cenário que considera o agravamento do grau de irregularidade, entupimento efeito de sedimentos sólidos e crescimento inadequado da vegetação no Rio Prata do Cabuçu. Além disso, deve-se lembrar que o modelo adotado não representa os cursos d'água como canais de leito móvel; portanto, o assoreamento representa uma obstrução parcial ao escoamento nos canais, o que é representado por um maior coeficiente de rugosidade.

Partindo do cenário de linha de base, assume-se que a manutenção dos canais, em geral, não será realizada. O cenário de falta de manutenção para os próximos 25 anos considerou um aumento no coeficiente de Manning devido ao grau de irregularidade causado pelo acúmulo de sedimentos no fundo dos rios e canais, os efeitos de obstrução causados pelos resíduos sólidos e o crescimento da vegetação (que principalmente afeta os fluxos superiores do rio). Este cenário aproxima os resultados de uma situação real de funcionamento do sistema de drenagem e das suas falhas.

A Figura 4-74 apresenta as manchas de inundação para o TR10, enquanto a Figura 4-75 apresenta os resultados para o TR25. Adicionalmente, poderiam ser apresentados a este cenário os resultados apresentados de extravasamento nos poços de visita e contribuições de inundações no sistema de esgotamento sanitário apresentados no cenário anterior, porém, para simplificação serão apresentadas somente as manchas de inundação. Além

disso, pela amplitude das inundações verificadas, é evidente que ocorre a interação entre as 3 camadas simuladas.

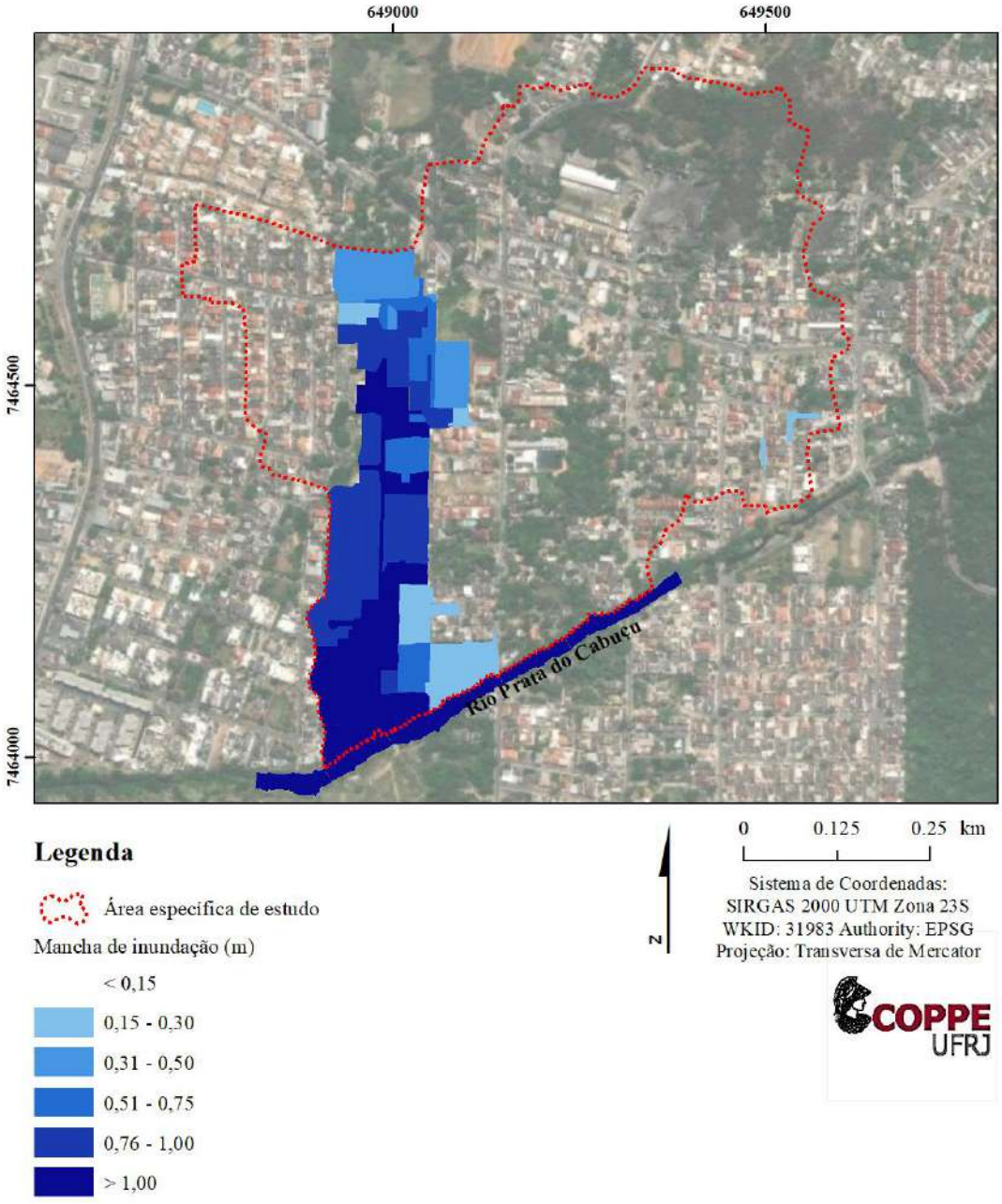

Figura 4-74. Mancha de inundação ocasionada pela falta de manutenção dos sistemas de microdrenagem e macrodrenagem para o TR 10. Fonte: Elaboração própria.

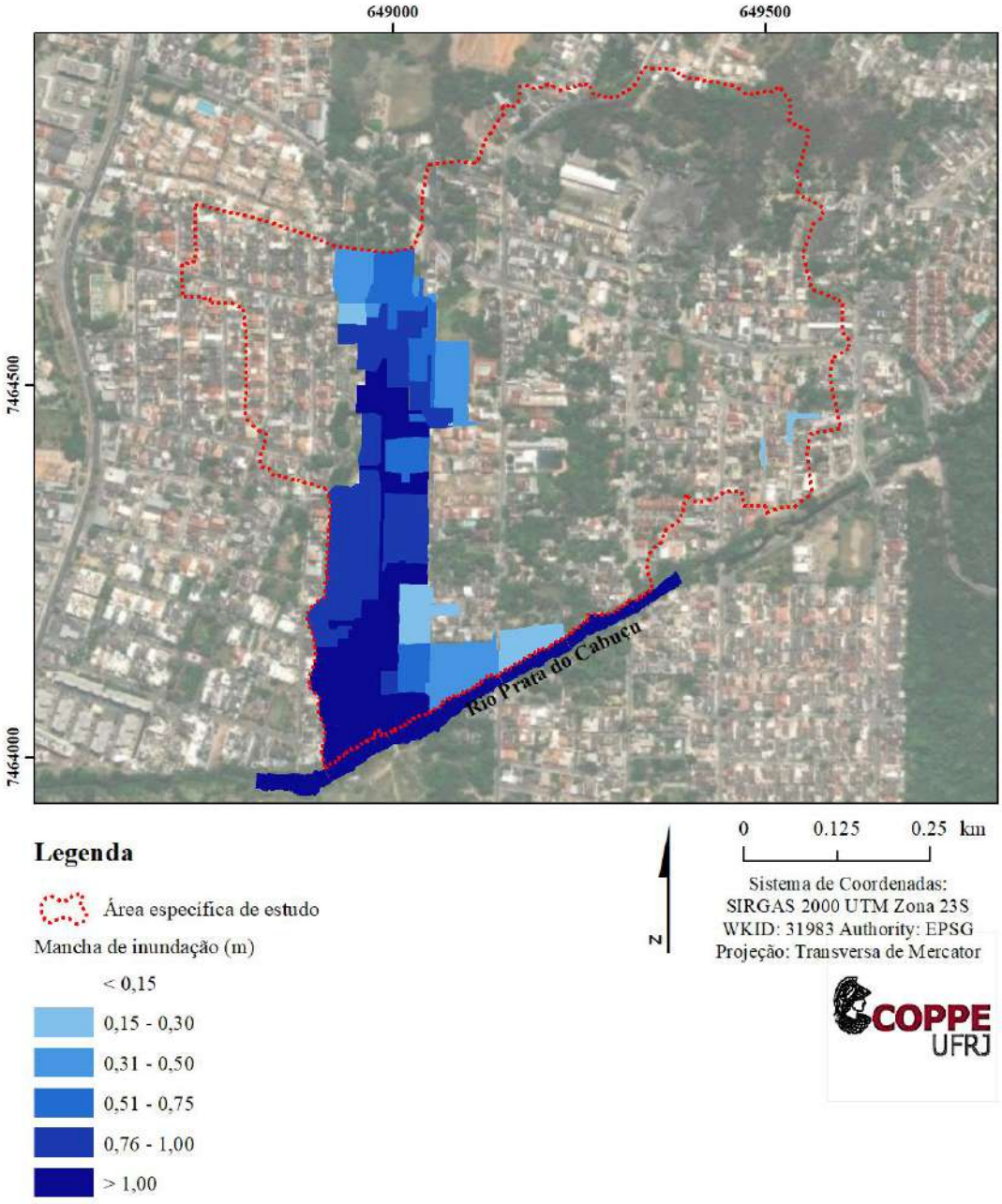

Figura 4-75. Mancha de inundação ocasionada pela falta de manutenção dos sistemas de microdrenagem e macrodrenagem para o TR 25. Fonte: Elaboração própria.

4.2.5.3 Ausência de sistema de esgotamento sanitário

Para este cenário as redes de microdrenagem recebem diretamente a contribuição de esgoto doméstico. Este cenário pode corresponder a um cenário de simulação no qual o sistema de microdrenagem foi implementado antes do sistema de esgotamento sanitário em determina região.

Para simulação deste cenário, as condições de contorno de vazão representando o aporte de esgoto foram aplicadas às células dos PVs de drenagem, uma vez que o sistema de esgotamento sanitário foi retirado da simulação.

Os resultados permitem observar, sob o ponto de vista da quantidade de escoamentos, que as galerias têm capacidade excedente para transportar o aporte de esgoto. Vale destacar que o pico de dimensionamento da contribuição do sistema 1 é de 1,42 m³/s segundo as simulações realizadas para o TR de 10 anos, enquanto a vazão de esgoto no final do horizonte de planejamento é de 0,012 m³/s, o que corresponde a uma relação de aproximadamente 1:100 para este sistema específico.

Os resultados dos perfis das galerias de drenagem recebendo a contribuição de esgoto, apresentados na Figura 4-76 (Sistema 1), Figura 4-77 (Sistema 2) e Figura 4-78 (Sistema 3) corroboram com o anteriormente citado em relação ao volume desprezível do esgoto diante do tamanho das galerias, no que diz respeito à capacidade hidráulica. Vale destacar que apesar de pouco volume proporcional ao volume de águas pluviais, a contribuição de esgoto tem potencial de degradação ambiental significativo, diante das elevadas concentrações de matéria orgânica e microrganismos.

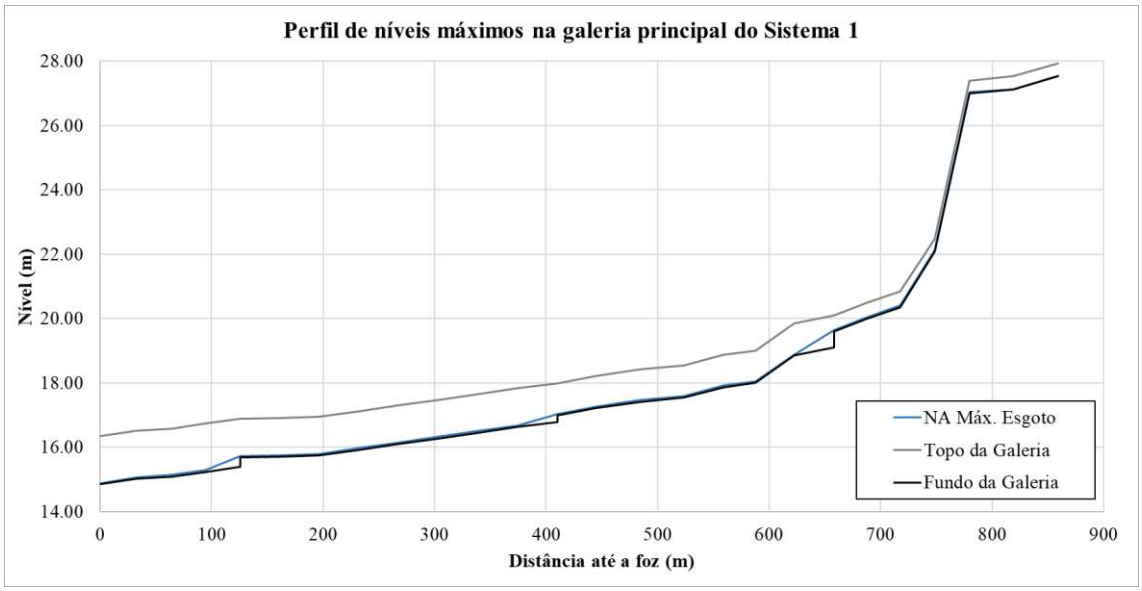

Figura 4-76. Simulação das redes de drenagem do Sistema 1 recebendo a contribuição de esgoto para tempo seco. Fonte: Elaboração própria.

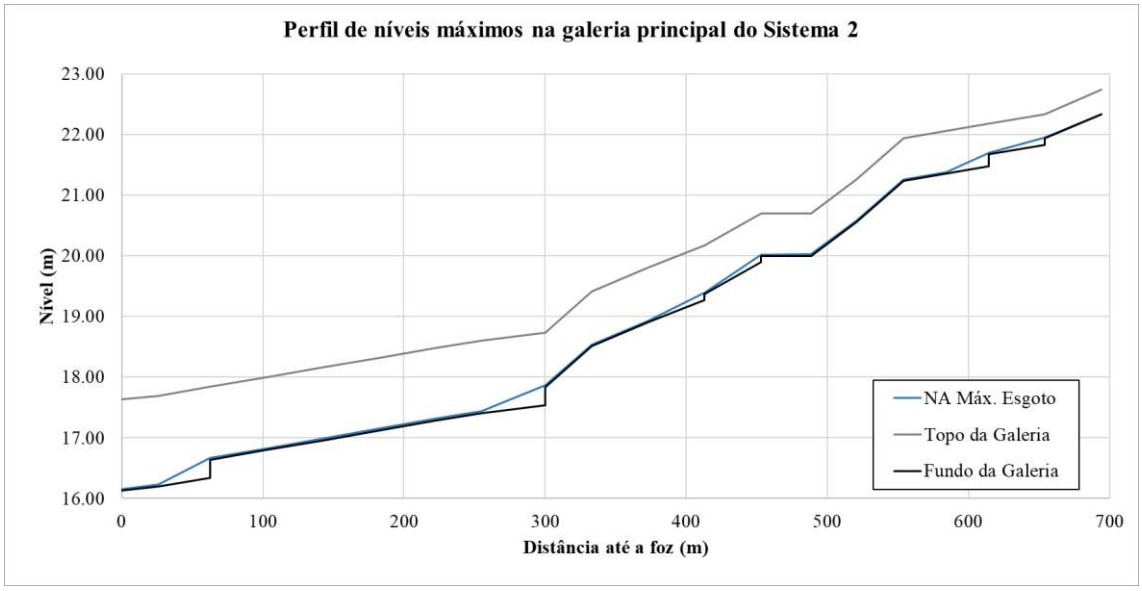

Figura 4-77. Simulação das redes de drenagem do Sistema 2 recebendo a contribuição de esgoto para tempo seco. Fonte: Elaboração própria.

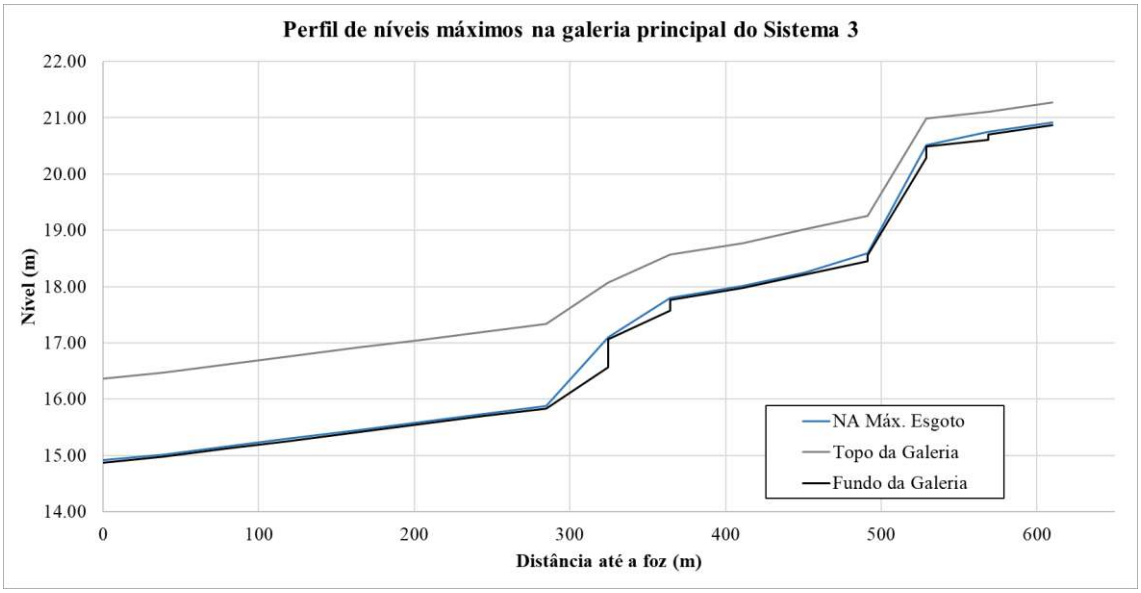

Figura 4-78. Simulação das redes de drenagem do Sistema 3 recebendo a contribuição de esgoto para tempo seco. Fonte: Elaboração própria.

4.2.5.4 Expansão populacional não planejada no dimensionamento do sistema de esgotamento

Segundo Freitas *et al.* (2016) o bairro de Campo Grande é a região administrativa da cidade com maior potencial de crescimento e está em elevada expansão populacional. Considerações realizadas na etapa de dimensionamento podem não considerar a dinâmica real de crescimento populacional de uma região, e, adicionalmente, principalmente em pequena escala (ex.: rua, setor censitário), é difícil prever a real população que irá contribuir com esgoto doméstico à rede no final do horizonte de planejamento.

Com cerca de 6 mil metros quadrados disponíveis a área situada de frente para a Praça Pedro Veloso da Silveira apresenta um potencial de expansão urbana concentrada, em um trecho inicial da rede de esgotamento sanitário. A Figura 4-79 apresenta a localização do empreendimento habitacional hipotético.

A entrada do empreendimento hipotético que irá ser responsável por um aumento populacional não planejado no dimensionamento da rede de esgotamento sanitário, pode ser vista na Figura 4-80. Esta entrada coincide com o poço de visita número 36 do sistema de esgotamento sanitário, representado pela célula de escoamento número 32046.

As simulações realizadas para a presente falha dos sistemas levam em conta possíveis cenários de expansão populacional gerada pela implementação do empreendimento. Para estes cenários de expansão foram utilizados os parâmetros anteriormente citados que consideram a contribuição de esgoto por habitante de 223 L/hab.dia (SNIS, 2021), e a taxa de retorno de 80%, sendo assim possível determinar uma contribuição de esgoto diante dos diversos cenários de aumento populacional.

Foram simulados alguns cenários de expansão populacional, e analisados os resultados na célula que representa o PV de esgoto que irá receber o aumento da contribuição de esgoto.

O primeiro cenário de expansão corresponde ao empreendimento seguir um padrão construtivo compatível com os condomínios residenciais locais, nos quais é possível implementar nesta área, confortavelmente, 3 edificações de 8 andares mais térreo, com 8 apartamentos por andar, totalizando no condomínio 192 apartamentos. Analisando os dados do IBGE pela grade estatística (IBGE, 2010) foi possível determinar uma média de aproximadamente 3 habitantes por domicílio. Sendo assim, é estimado que, para a taxa

de ocupação completa, o empreendimento domiciliar comporte 576 habitantes, que equivalem a um incremento de 1,19 L/s no sistema de esgotamento sanitário.

Partindo deste cenário de expansão 1, foram simulados mais 4 cenários de expansão que consideram um adensamento populacional maior. O segundo cenário duplica a população do cenário 1, passando a ter 1152 habitantes. Os cenários de expansão 3, 4 e 5, aumentam a população para 2880, 3456 e 4608 habitantes, respectivamente.

Os cenários relacionando população e contribuição de esgoto, bem como os resultados da simulação podem ser vistos na Tabela 4 2. Adicionalmente a Figura 4 78 apresenta a vista do PV em questão e os diferentes níveis de esgoto sanitário na célula obtidos pela simulação hidrodinâmica.

Para o cenário de expansão 1, vale destacar que 576 habitantes não saturam a rede de esgotamento dimensionada, a qual altera seu preenchimento (Y/D – profundidade sobre diâmetro) de 40% e para 70%. Em relação ao cenário de expansão 2, a rede começa a funcionar sob pressão, funcionamento que não corresponde ao adequado e pode gerar, entre outros problemas contribuição de esgoto ao solo e contaminação local.

Para o cenário 3, é observado que o PV está na eminência do extravasamento, e para os cenários 4 e 5 é verificado o extravasamento pelo tampão do PV, acumulando uma lâmina de 5 e 9 centímetros de esgoto sobre o tampão do PV para os cenários 4 e 5 respectivamente.



Figura 4-79. Localização do empreendimento domiciliar hipotético da bacia de esgotamento do Sistema 1. Fonte: Elaboração própria.

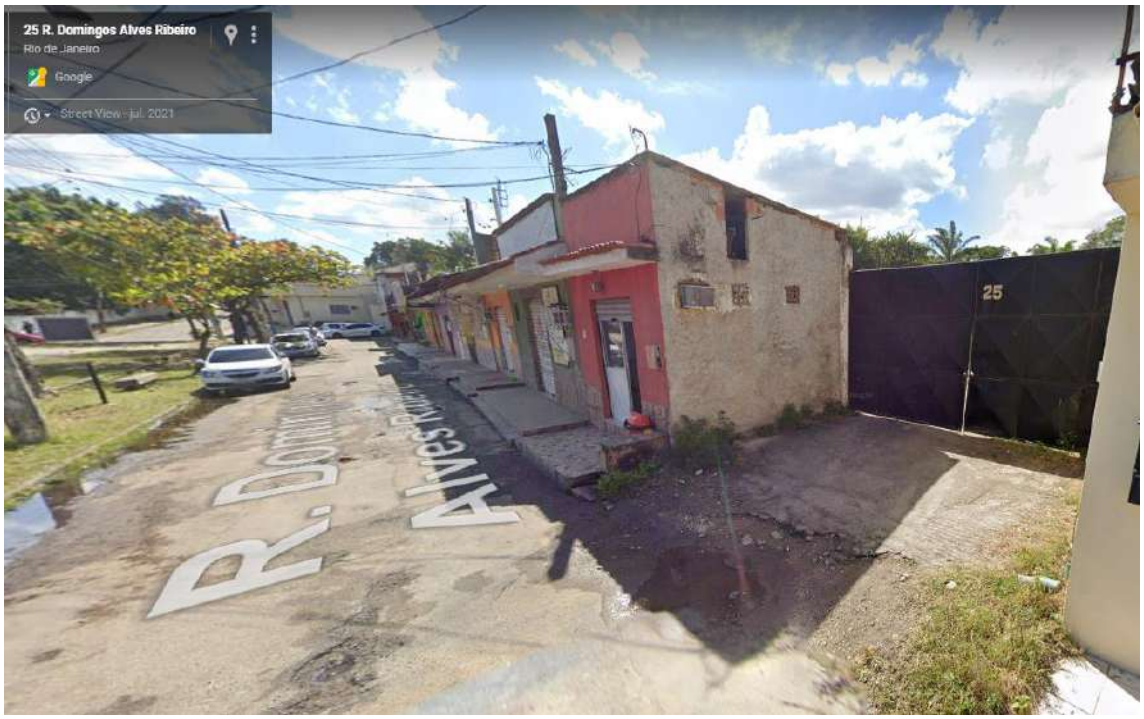

Figura 4-80. Vista frontal da entrada do novo empreendimento domiciliar hipotético para o qual será verificado o aumento da contribuição de esgoto. Fonte: Google Street View (2022)

Tabela 4-2. Resultados da simulação de incremento populacional e impactos sobre a rede de esgotamento sanitário. Fonte: Elaboração própria.

Cenário de expansão	**Incremento de Populacional ao projeto**	**Vazão afluente ao PV 34 (L/s)**	**Consequência**
0	0	0.11	Y/D = 40%
1	576	1.30	Y/D = 70%
2	1152	2.49	Rede sob pressão
3	2880	6.06	Eminência do extravasamento
4	3456	7.25	Extravasamento
5	4608	9.63	Extravasamento

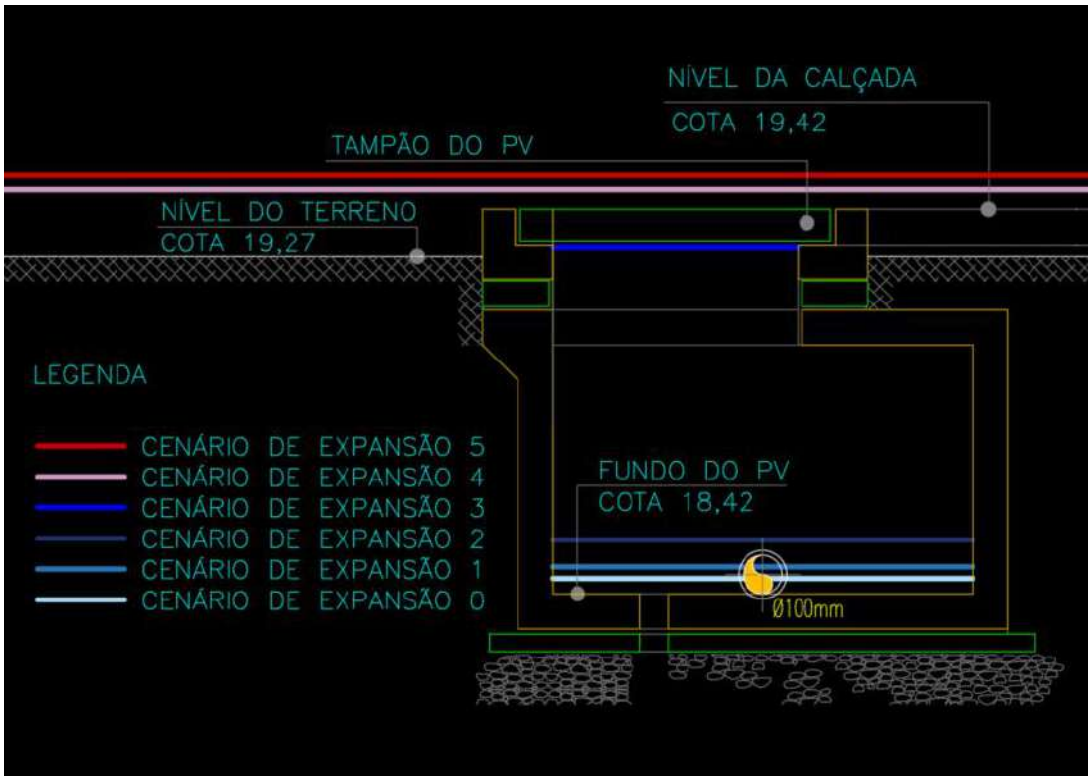

Figura 4-81. Níveis de esgoto sanitário na célula correspondente ao poço de visita que recebe hipoteticamente uma região de expansão urbana. Fonte: Elaboração própria.

Para os cenários de extravasamento, a água sai do sistema de esgotamento sanitário, aporta a camada superficial, acumulando nas ruas, e é captada pelo primeiro ralo ou boca de lobo, contribuindo para o sistema de drenagem e consequentemente para o corpo hídrico receptor. Na prática, como medida paliativa para estas situações, é implementada uma estrutura de vertimento do sistema de esgoto para o sistema de drenagem de maneira subsuperficial, evitando que o esgoto contribua para a superfície. Vertedor entre os sistemas ou esgoto a céu aberto, são realidades encontradas e a metodologia proposta apresenta potencial para sua representação.

4.2.5.5 Contribuição parasitária do sistema de drenagem pluvial residencial

Tsutya e Bueno (2005) destacam que apesar dos sistemas de drenagem e esgoto serem dimensionados de maneira separada, parte da água de chuva contribui para o sistema de esgoto pela drenagem das edificações. Vale destacar que segundo a ABNT (1992) o dimensionamento de estruturas de tratamento não leva em conta a contribuição parasitária pluvial, ocasionando diversos transtornos no processo de tratamento. Em sua publicação Nascimento e Araújo (2003) destacam que as contribuições parasitárias podem ocorrer pelas interligações das redes de água pluvial às redes de esgoto e pelos tampões dos PVs de esgoto e outras singularidades com aberturas.

A contribuição pelos PVs e singularidades, oriundas do acúmulo de água nos logradouros e lotes já foi verificada nas possíveis interações entre os sistemas pela falha completa do sistema de microdrenagem e pela falta de manutenção do sistema de drenagem, previamente analisadas. Desta forma, o presente tópico procura representar a partir do processo de simulação hidrodinâmica integrada a conexão irregular de sistemas de drenagem pluvial residencial diretamente ao sistema de esgotamento sanitário.

O esquema de simulação se assemelha à representação do sistema de drenagem, com a diferença que a ligação de orifício, conectada ao PV de drenagem fica obsoleta e passa a funcionar a ligação de orifício conectada ao PV de esgoto, conforme pode ser visto na Figura 4-82.

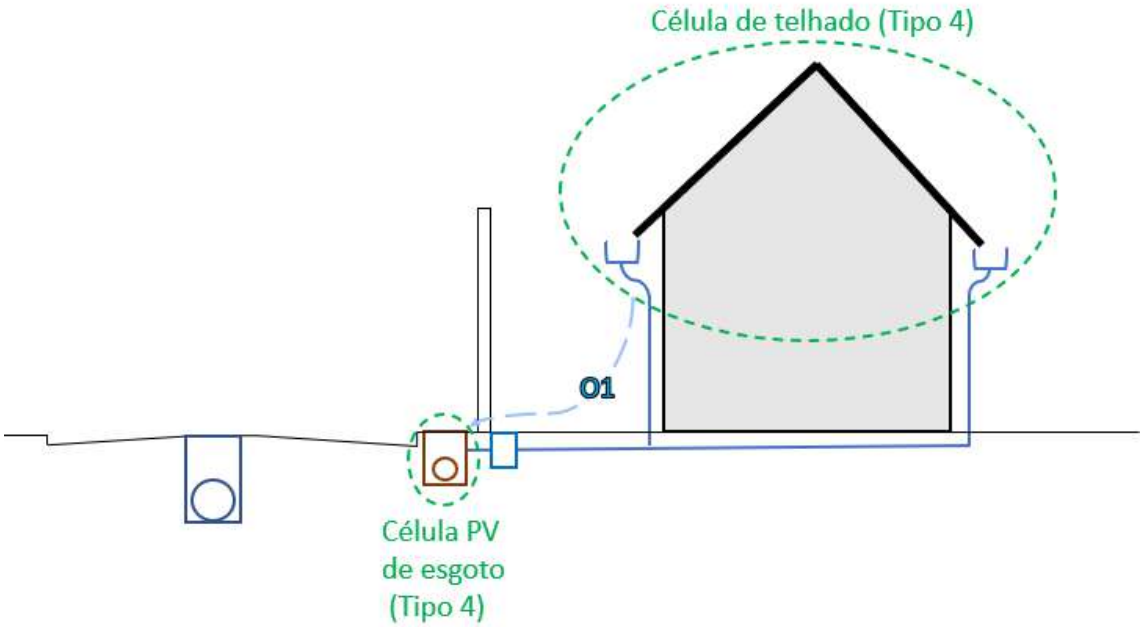

Figura 4-82. Esquema de representação da contribuição pluvial predial no sistema de esgotamento sanitário. Fonte: Elaboração própria.

Vale destacar que o modelo MODCEL-SHIM foi construído par poder representar de maneira ágil diversas conexões prediais parasitárias. Assim, cada telhado do território é representado por duas células de escoamento de áreas iguais que correspondem ao mesmo espaço físico. A primeira célula de telhado (telhado regular) é conectada por orifício ao sistema de drenagem, já a segunda célula de telhado (telhado parasitário) é conectada por orifício ao sistema de esgotamento sanitário. Para uma representação regular, é aplicado o dado de entrada de chuva apenas na célula de telhado regular. Por outro lado, para a representação de uma situação parasitária, é retirada a chuva da célula de telhado regular e aplicada como dado de entrada para a célula de telhado parasitária. A Figura 4-83 apresenta de maneira esquemática este tipo de artifício de simulação que tornou viável a simulação de vários cenários de contribuição parasitária.

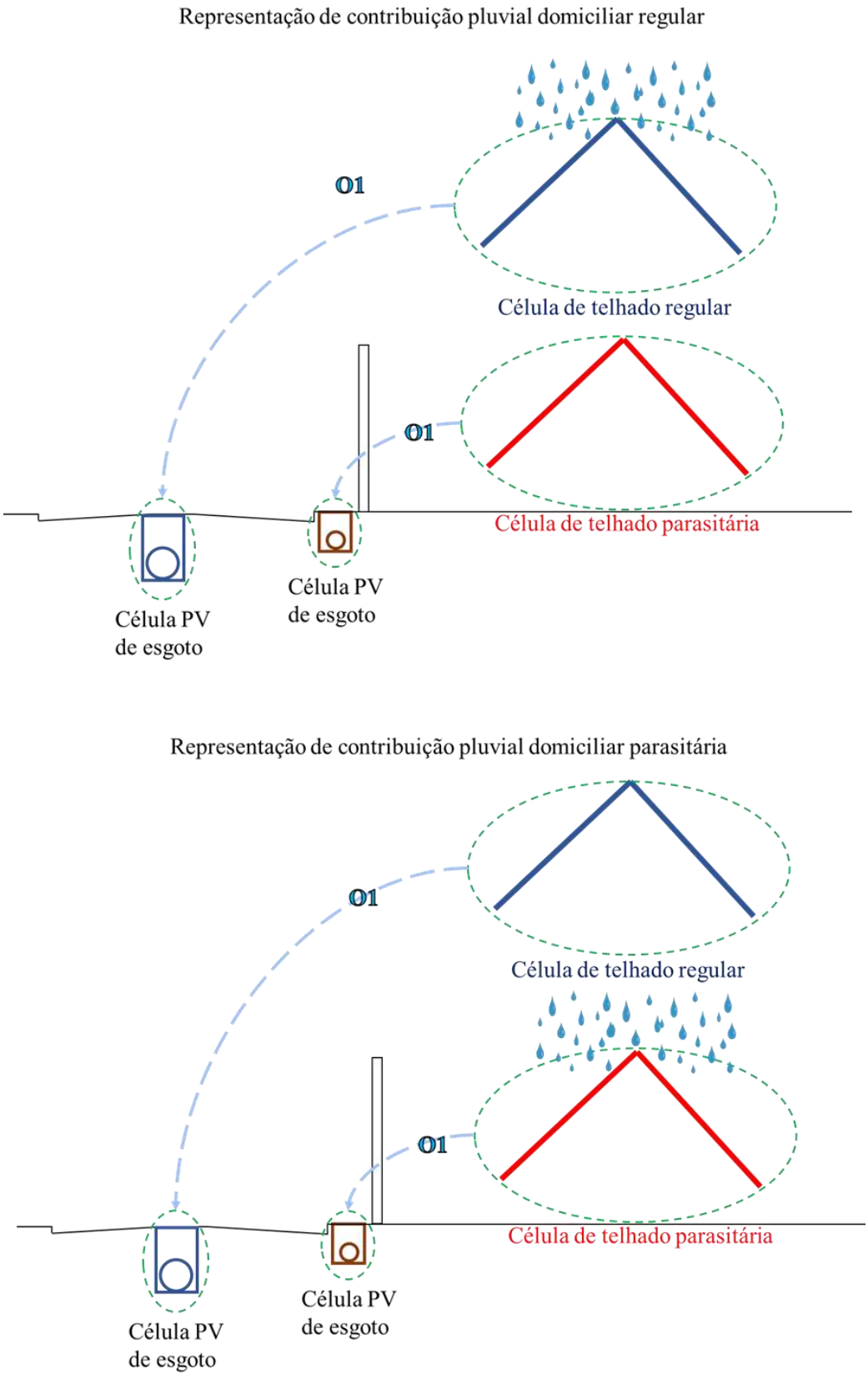

Figura 4-83. Esquema de modelagem da situação regular e parasitária a partir da representação do mesmo telhado das edificações. Fonte: Elaboração própria.

Porém, determinar na prática as edificações com contribuições parasitárias é uma tarefa complicada visto a quantidade de conexões existentes em uma só bacia de esgotamento. A título de exemplo, o Sistema 1, para o qual foi dimensionada a rede de esgotamento sanitário, possui uma área de 0,15 km² e cerca de 830 domicílios para a situação atual.

Dessa forma, a presente simulação tem por objetivo obter uma envoltória provável do percentual de contribuições pluviais parasitárias advindas das edificações. Este valor percentual pode ser calibrado por medições de vazões em pontos chave do sistema de esgotamento sanitário em dias de chuva.

Para guiar esta simulação foi realizada uma distribuição aleatória de telhados com contribuições parasitárias para o sistema de esgoto seguindo os percentuais de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 50% sobre a área de todos os telhados dentro da bacia de esgotamento. Como resultado, foram observados os seguintes incrementos de vazão no exutório do sistema: 75,7%, 91,2%, 91,2%, 114,6%, 132,6%, 132,9% e 136,7%.

A Figura 4-84 apresenta as vazões observadas no exutório do sistema de esgotamento, ou seja, que contribuem para a ETE. A figura apresenta também a vazão de contribuição de esgoto sem chuva para a qual deve ser dimensionada a estação. Adicionalmente, é apresentado o hietograma da chuva de TR10 anos, utilizada para a presente simulação.

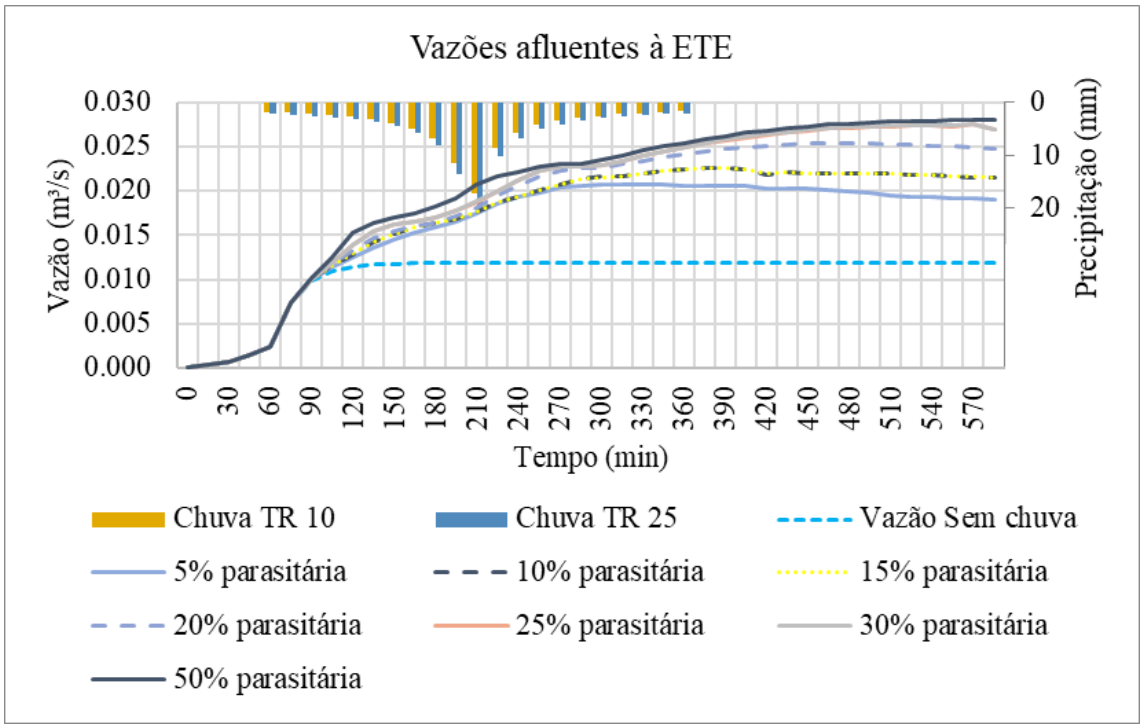

Figura 4-84. Vazões de contribuição à ETE para diversos cenários de contribuição parasitária de edificações, considerando uma rede de microdrenagem funcional. Fonte: Elaboração própria.

É possível observar a partir dos resultados que o aumento de vazão no exutório pelo percentual de telhados com contribuição parasitária não é linear. De maneira a mapear de maneira mais ampla o comportamento do sistema esgoto-drenagem frente às possíveis alterações das contribuições parasitárias foram realizados diversos sorteios aleatórios de contribuições irregulares dos telhados para os mesmos percentuais apresentados. Os resultados deste processo de simulação permitiram obter uma relação da variação dos percentuais de contribuições parasitárias e o percentual de incremento da vazão no exutório do sistema de esgotamento sanitário. A Figura 4-85 apresenta os resultados das simulações hidrodinâmicas na qual é possível observar a resposta do sistema em questão para um evento de tempo de recorrência de 10 anos. Para este problema é possível verificar que a relação de percentual de contribuição parasitária e percentual de incremento de vazão segue um comportamento próximo a uma curva exponencial.

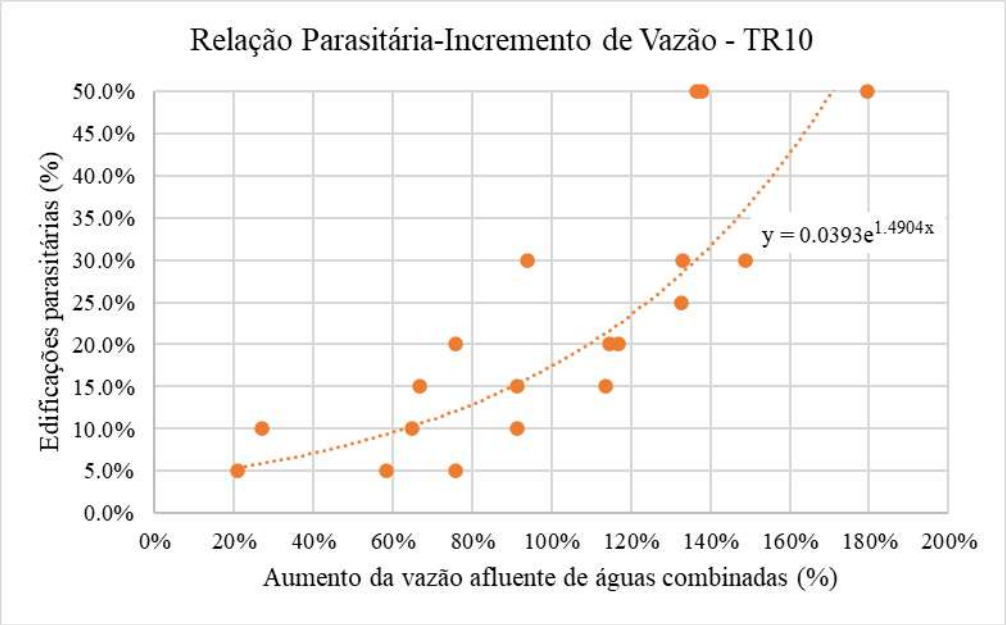

Figura 4-85. Resposta do sistema ao aumento de contribuição parasitária no TR 10. Relação parasitária-incremento de vazão do sistema. Fonte: Elaboração própria.

Os casos hipotéticos simulados englobam uma parcela significativa dos problemas de interação entre os sistemas estudados. Para um cenário real, após a aplicação do MODCEL-SHIM com foco no problema específico em questão, o próximo passo poderá ser a simulação da qualidade da água nos processos de interação (complementando o diagnóstico), caso demandado, ou, diretamente, a busca por alternativas para mitigar as interações observadas, ou o seu efeito sobre o meio ambiente e a cidade. Os próximos tópicos apresentam estas etapas subsequentes à aplicação do MODCEL-SHIM.

4.3 ETAPA 3 – Modelagem Ambiental para a bacia piloto

Neste capítulo serão apresentados exemplos de aplicação do MODCEL-SHIM integrado à Modelagem de Qualidade Ambiental, utilizando a equação de Streeter-Phelps, para obtenção de diagnóstico das interações entre os sistemas de drenagem e esgotamento.

Diante dos diversos cenários hipotéticos de simulação realizados, optou-se por aplicar a metodologia de análise da qualidade de água no cenário de falha completa ou ausência do sistema de drenagem urbana, que configura o pior cenário no que diz respeito à interação entre ambos os sistemas, levando em conta, principalmente, a degradação do ambiente urbano e a possibilidade de contato da população com doenças de veiculação hídrica. O modelo utilizado corresponde às respostas de um sistema disfuncional considerando um evento de chuva intensa de 10 anos recorrência.

Como descrito no capítulo de metodologia, serão apresentados os resultados de simulação de DBO para a interação entre as células de escoamento correspondentes a cada uma das camadas simuladas em conjunto.

No que diz respeito ao consumo de DBO, será utilizada a fórmula apresentada na Equação 4-3, e será considerado um coeficiente de desoxigenação igual a 0,44 dia^{-1}. Este valor corresponde a um parâmetro de literatura médio correspondente a rio raso, recebendo esgoto bruto concentrado na temperatura de 22ºC (Von Sperling, 2014).

$$L = L_0 e^{-k_1 t} \qquad \text{Equação 4-3}$$

Na equação apresentada: L representa a concentração de DBO remanescente (mg/L); L_0 é a concentração no ponto inicial de DBO, ou no ponto de lançamento do efluente, (mg/L); k_1 é o coeficiente de desoxigenação (dia^{-1}); e t é o intervalo de tempo.

Em relação aos parâmetros iniciais de DBO, foi considerado para o rio Prata do Cabuçu uma DBO de 8,0 mg/L conforme apresentado pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMADS, 2001).

Em relação à DBO do esgoto doméstico, foi considerado um valor de 350 mg/L conforme valores sugeridos por Von Sperling (1996).

Para as águas pluviais, foi considerada a publicação de Weibel *et al.* (1964) que estabelece diferentes valores de DBO para as durações de chuva, levando em conta

valores mais elevados para as primeiras águas escoadas. Os valores utilizados podem ser vistos na Tabela 4-3.

Tabela 4-3. Valores de concentração dos parâmetros de DBO frente a tempo do evento pluviométrico. Fonte: Weibel *et al*. (1964)

Parâmetro	0 – 15 min	15 – 30 min	30 – 60 min	60 – 120 min	> 120 min
DBO	28 mg/L	26 mg/L	23 mg/L	20 mg/L	12 mg/L

Os resultados do modelo podem ser observados para todas as células de escoamentos representadas, sendo capaz de observar 284 pontos de concentração de DBO somente no Sistema 1. Os principais resultados foram elencados levando em conta ruas e lotes com taxas elevadas de DBO, bem como variações de DBO no sistema de esgotamento sanitário que podem afetar os processos tratamento dos efluentes.

Para os resultados em ruas destaca-se a célula 1039. Os resultados para a concentração de DBO no trecho de rua são apresentados na Figura 4-86. É possível observar que a DBO na rua ultrapassa os 35 mg/L que representa uma concentração maior que a observada nas estimativas do escoamento pluvial, indicando concentração de esgoto. Adicionalmente a figura apresenta a lâmina de água na célula de rua, e sua interpretação permite observar que no momento de maior alagamento, cerca de 20 centímetros, é verificada uma DBO de 26 mg/L.

Para melhor entendimento dos resultados, a Figura 4-87 apresenta as vazões afluentes à célula de rua. É possível observar a contribuição do escoamento superficial da rua a montante e dos lotes, em comparação à contribuição do extravasamento de um PV de esgoto. Após o pico da contribuição do escoamento superficial o PV de esgoto começa a extravasar, justificando a elevação dos níveis de DBO na célula, o que ocorre paralelo à redução dos níveis de alagamento.

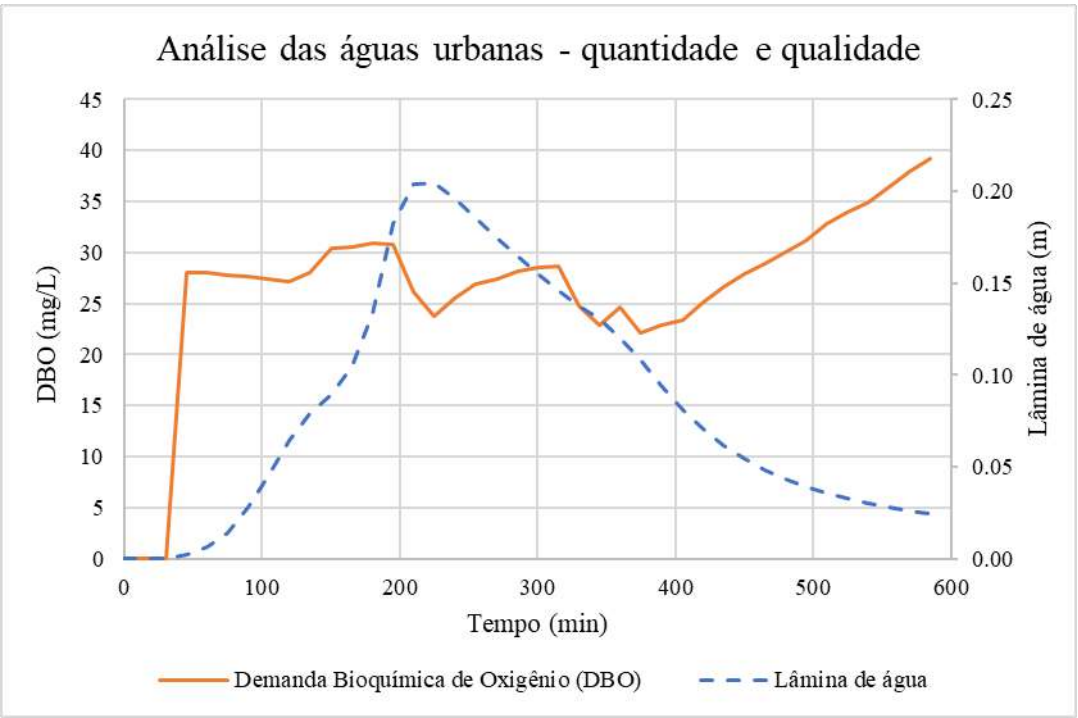

Figura 4-86. Variação de nível e concentração de DBO na célula de rua número 1039. Fonte: Elaboração própria.

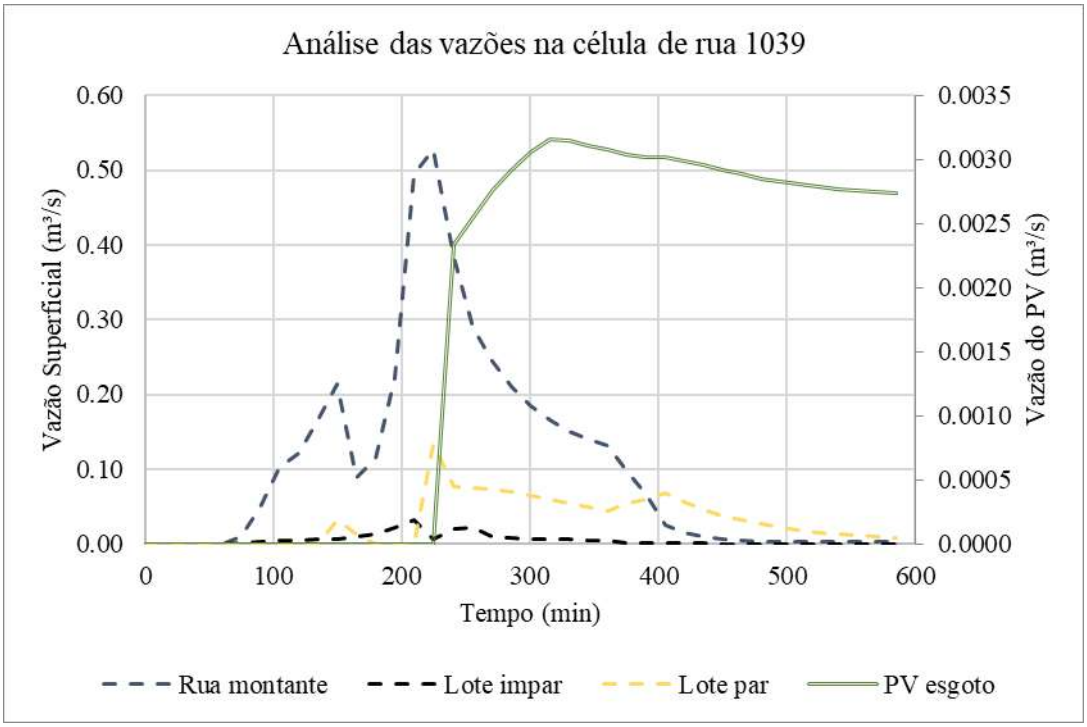

Figura 4-87. Vazões afluentes à célula de rua 1039. Fonte: Elaboração própria.

Adicionalmente, podem ser verificados os níveis e a concentração de DBO em dois lotes edificados apresentados na Figura 4-88 e na Figura 4-89, referentes às células 2021 e 2047. Podem ser observadas concentrações de DBO, principalmente após a passagem da cheia urbana ocasionada pelo evento pluviométrico intenso estudado, correspondente ao TR 10.

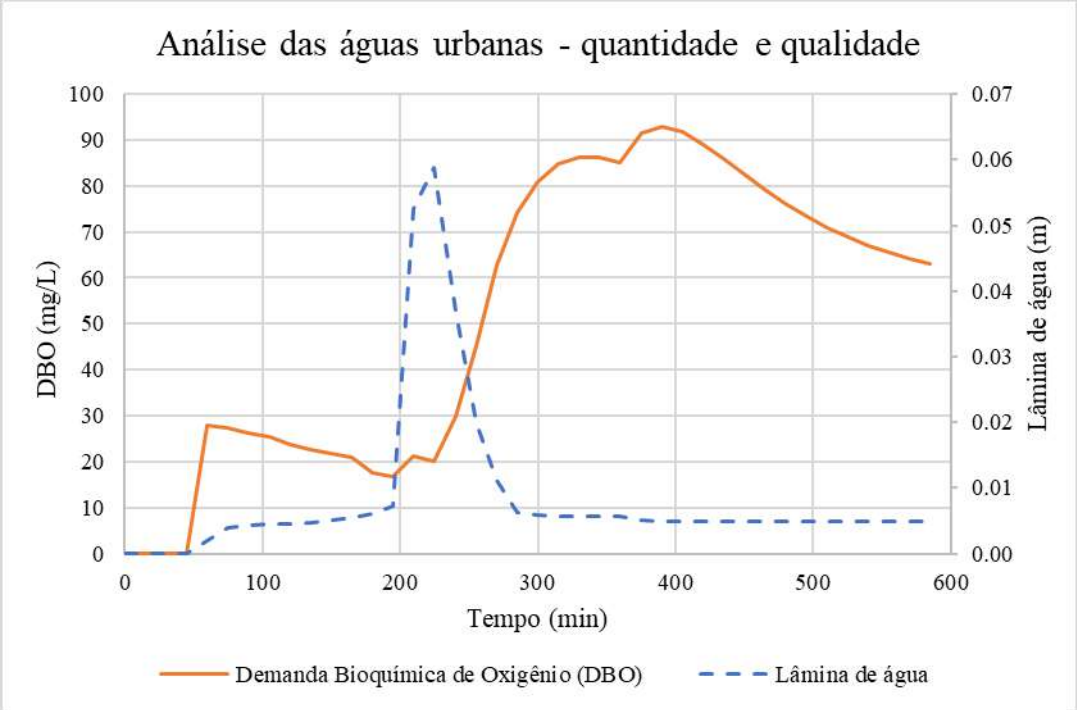

Figura 4-88. Variação de nível e concentração de DBO na célula de lote número 2021.
Fonte: Elaboração própria.

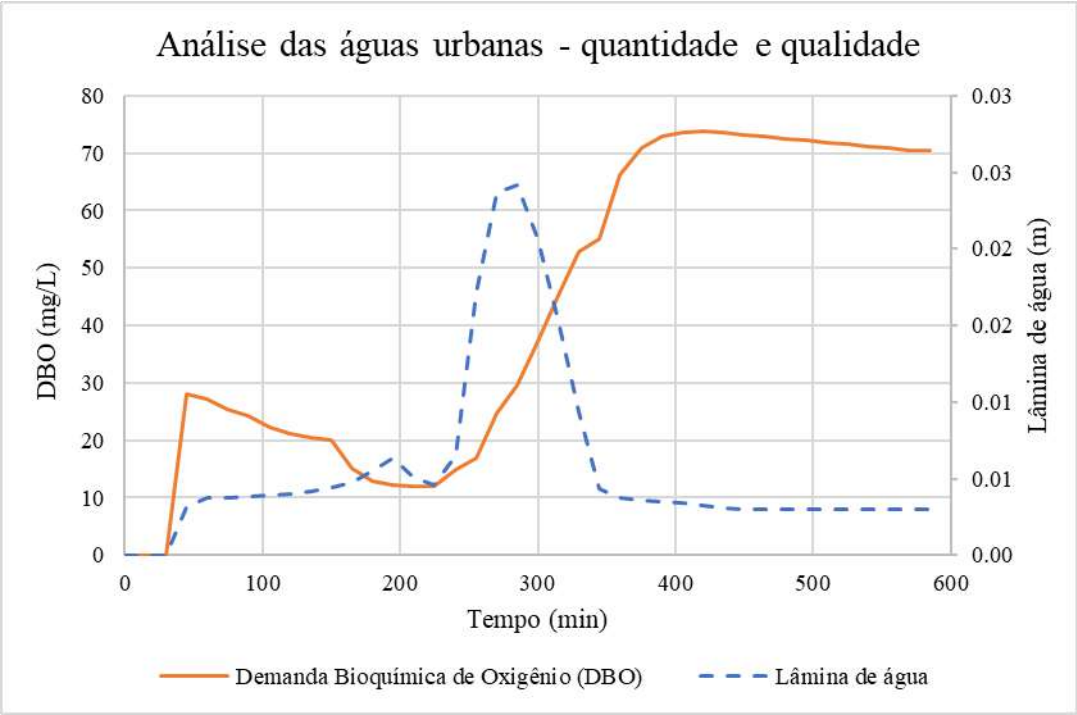

Figura 4-89. Variação de nível e concentração de DBO na célula de lote número 2047. Fonte: Elaboração própria.

Os resultados no rio Parta do Cabuçu também podem ser analisados, observando a Figura 4-90. É possível observar que por volta do minuto 120, ocorre o decaimento da DBO do rio seguindo os parâmetros considerados, porém, após as respostas do escoamento superficial e à mistura das águas da chuva com os esgotos domésticos e o seu consequente vertimento para o rio há um aumento da DBO no curso d'água.

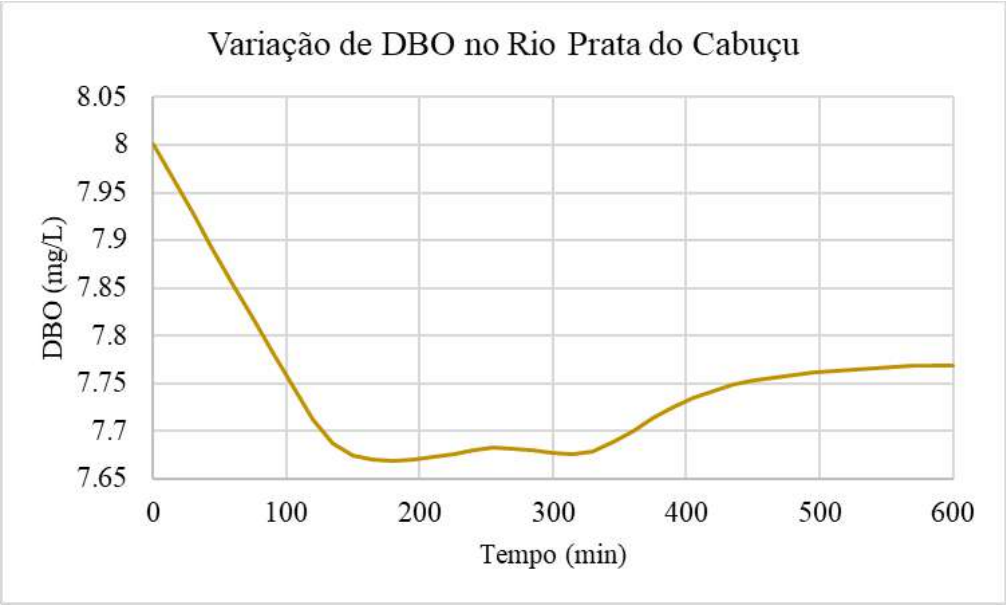

Figura 4-90. Variação de DBO no Rio Prata do Cabuçu na seção mais próxima ao exutório do sistema de esgotamento sanitário. Fonte: Elaboração própria.

Finalmente um resultado importante do modelo está na observação dos resultados de DBO no sistema de esgotamento sanitário. A redução da DBO afluente aos sistemas de tratamento pode afetar os processos das ETEs, e em alguns casos, inviabilizá-los.

Há no sistema estudado dois principais casos críticos de concentração de DBO nos PVs de esgoto. No primeiro caso há contribuição pluvial na singularidade, porém, esta contribuição cessa, e as concentrações originais de esgoto são recuperadas. A Figura 4-91 apresenta os resultados de uma célula de PV de esgoto (32062) com este tipo de funcionamento.

O segundo caso, corresponde a células de PV que se encontram em regiões cujos alagamento se mantém apesar do fim do evento pluviométrico. Estas regiões correspondem a depressões naturais do terreno que precisam do sistema de drenagem subsuperficial para esvaziar. Os resultados deste tipo de falha podem ser vistos na célula 32008 que representa o PV de esgoto nesta situação, cujas saídas estão compiladas na Figura 4-92.



Figura 4-91. Concentração de DBO nas águas mistas presentes no PV de esgoto representado pela célula 32062. Fonte: Elaboração própria.



Figura 4-92. Concentração de DBO nas águas mistas presentes no PV de esgoto representado pela célula 32008. Fonte: Elaboração própria.

Complementar aos resultados, pode ser observada a variação de DBO na ETE do Sistema 1 na Figura 4-93. É possível observar que o evento pluviométrico de TR10 contribuindo para um sistema disfuncional, no qual as redes de microdrenagem não existem ou colapsaram, gera uma redução de 70% na DBO dos fluxos afluentes à ETE.

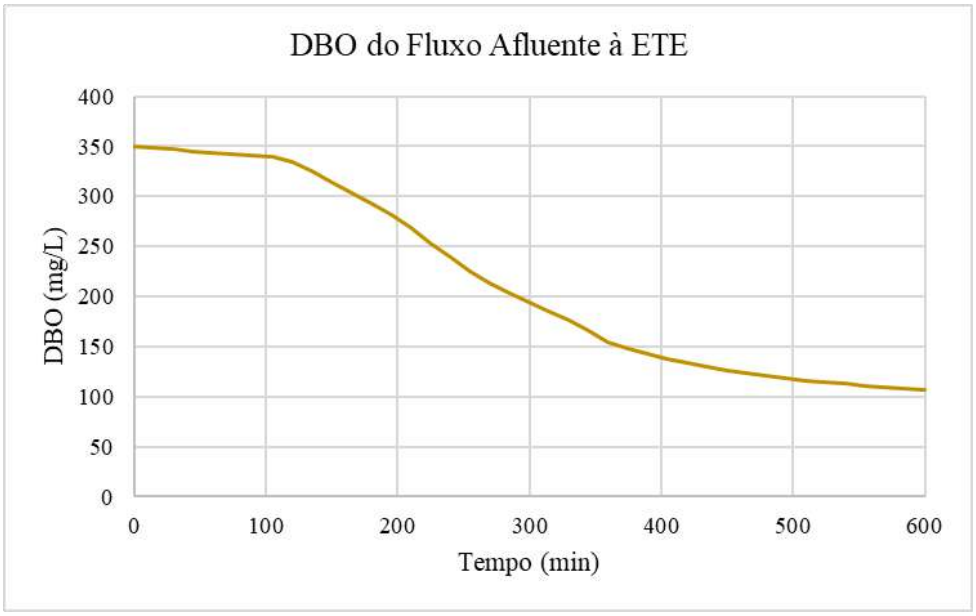

Figura 4-93. Concentração de DBO do fluxo (águas pluviais e esgoto) afluente à ETE para o TR10. Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4-94 apresenta, no Sistema 1, a localização das células citadas anteriormente, para as quais foram apresentados os resultados de concentração de DBO.

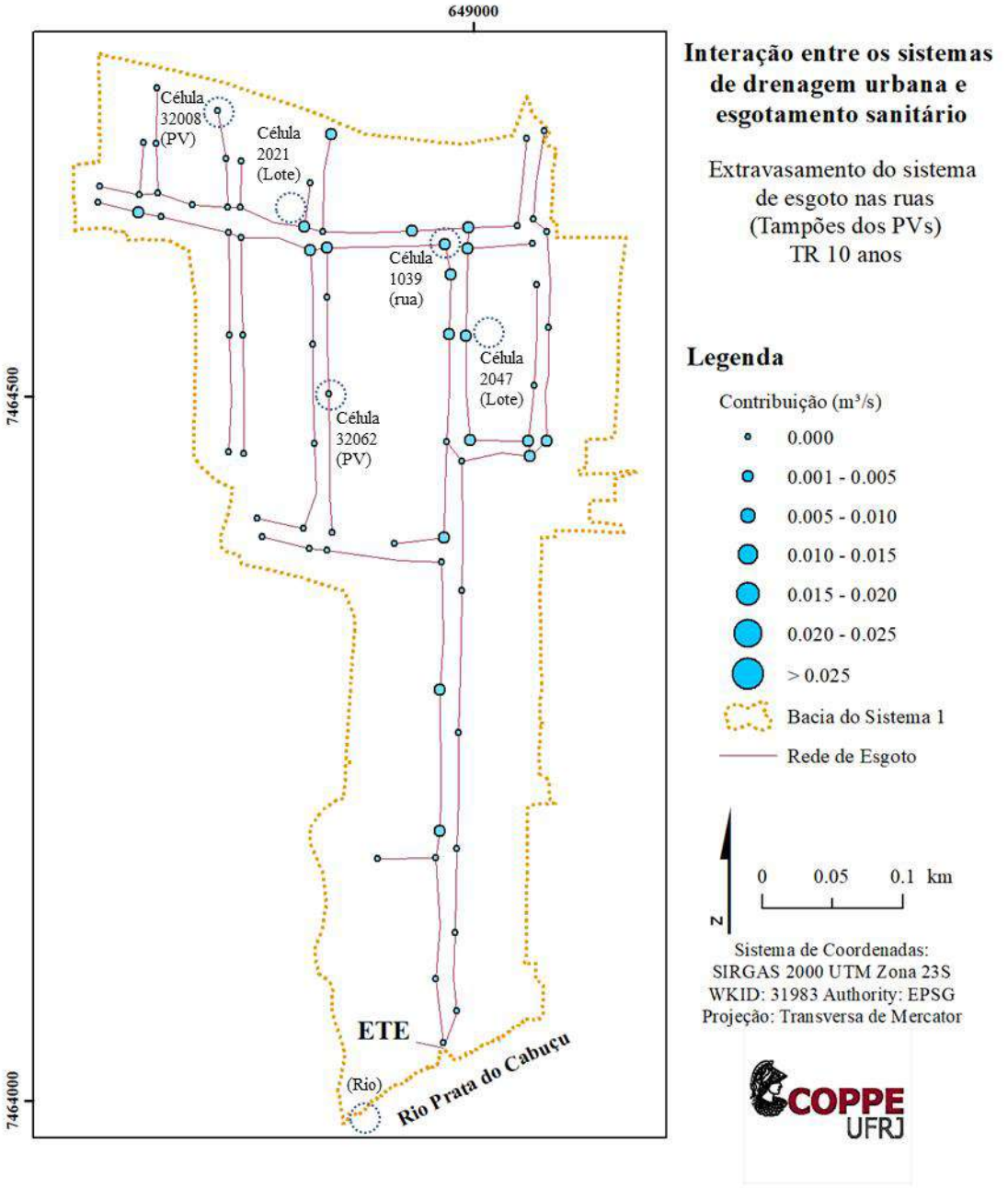

Figura 4-94. Localização das células de escoamento com resultados apresentados em relação à concentração de DBO. Fonte: Elaboração própria.

4.4 ETAPA 4 – Alternativas para mitigação das falhas na bacia piloto

Nesta etapa é proposto um projeto de intervenção para ordenamentos dos escoamentos pluviais, regularização da coleta de esgotos sanitários e redução dos riscos de inundação, com uso de soluções baseadas na natureza. Os resultados desta etapa buscam propor um projeto conceitual de intervenção, que poderá servir como diretriz básica para investimento em saneamento básico na região.

Diversas alternativas podem ser exploradas para as possíveis interações entre os sistemas simulados. Muitas alternativas, porém, partem do correto dimensionamento dos sistemas de drenagem urbana e de esgotamento sanitário. Outras necessitam de maior análise e contribuição do presente trabalho, uma vez que, mesmo para situações de correto dimensionamento seguindo as normas, ainda há cenários que não são previstos pelas referencias técnicas vigentes, principalmente sob o ponto de vista da interação entre os sistemas.

Outra necessidade de alternativas de mitigação das falhas dos sistemas parte da aceitação de que na prática não há sistema separador absoluto funcional e medidas que corrijam e /ou mitiguem a interação dos sistemas podem ser exploradas.

Como citado no capítulo de apresentação da metodologia, será explorada, prioritariamente, uma solução que incorpore o potencial máximo da ferramenta, procurando na camada superficial, soluções para as redes de drenagem e esgotamento.

Como diversos problemas foram simulados será escolhido um cenário integrado entre a falta de manutenção do sistema de drenagem, que gera inundações sobre o território e a falta de rede de esgotamento sanitário implementada. Este cenário corresponde à realidade vista em diversos espaços urbanos nos quais falhas de macrodrenagem são associadas a faltas de saneamento básico.

Os resultados da mancha de inundação são similares aos apresentados previamente, uma vez que o sistema de esgotamento sanitário não auxilia na drenagem dos volumes de cheia advindos do extravasamento do curso d’água principal, logo, sua inexistência, não altera as lâminas de inundação simuladas de maneira significativa.

Em relação à falta de rede de esgoto, os resultados em tempo seco são iguais aos apresentados no cenário de simulação da ausência de sistema de esgotamento sanitário.

Após a identificação dos principais problemas de cada uma das redes de águas urbanas e identificação de possíveis interações entre os sistemas é necessário a proposição de alternativas. Como citado anteriormente, a proposição de alternativas será guiada com caráter multifuncional, com soluções baseadas na natureza e infraestrutura verde e azul, que tenham capacidade de mitigar inundações e alagamentos e potencializar o tratamento de águas residuais. Para isto é necessário realizar o diagnóstico dos principais espaços livres disponíveis para este fim na área de estudo. É importante reconhecer quais espaços livres possuem características que facilitem o amortecimento de alagamentos, bem como possam ser incorporados para o sistema de tratamento de esgotos sanitários. Dessa maneira, é importante que estejam localizados próximos a linhas de escoamento, em áreas naturalmente alagáveis. Com a sobreposição dos espaços livres disponíveis e as manchas de alagamentos é possível determinar as melhores áreas para propor soluções de amortecimento de alagamentos. A Figura 4-95 apresenta do lado esquerdo a identificação dos principais espaços livres de edificações na sub-bacia e, do lado direito, locais com potencial para implementação de reservatórios de amortecimento de cheias que poderão também ser utilizados para processos de tratamento de águas residuais, com a implementação de *wetlands* construídos.

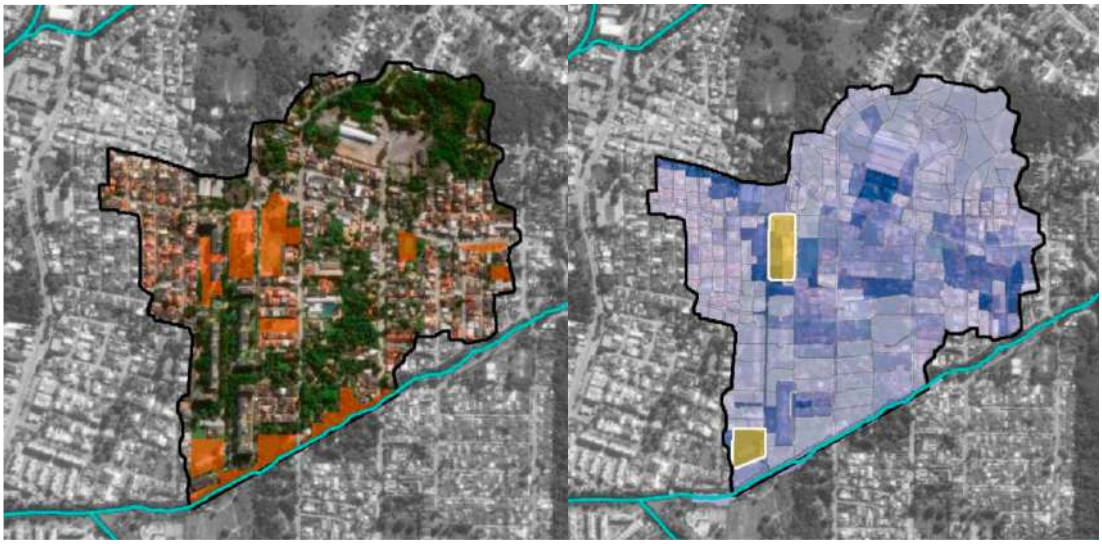

Figura 4-95. Identificação dos principais espaços livres de edificações na sub-bacia e locais com potencial para implementação de reservatórios de amortecimento de cheias e tratamento de águas residuais. Fonte: Elaboração própria.

Serão exploradas soluções à simulação hidrodinâmica para análise dos efeitos sobre a mitigação das inundações.

A alternativa parte da necessidade de evitar os extravasamentos do rio principal, e para isso, uma sobre elevação das margens do rio Prata Cabuçu deverá ser implementada, funcionando como dique de contenção de cheia. A região a ser elevada está localizada nas proximidades do encontro da Rua Severino Ferreira da Costa, com o curso d'água, região que apresenta os extravasamentos.

De maneira complementar, para evitar que os escoamentos contribuam para a região urbana pelo sistema de microdrenagem de jusante para montante, comportas unidirecionais deverão ser dimensionadas no final de cada galeria de drenagem. A implementação de comportas unidirecionais evita a contribuição do rio para o sistema de drenagem, mas também impede o esvaziamento do sistema de microdrenagem na situação de níveis elevados no curso d'água receptor. Dessa maneira um reservatório para acúmulo temporário das águas do sistema de drenagem deverá ser dimensionado, no qual serão retidas as águas do escoamento superficial da sub-bacia, até o esvaziamento do rio principal à níveis inferiores aos de chegada do sistema de microdrenagem.

A Figura 4-96 apresenta de maneira esquemática o PV de drenagem final dos sistemas de microdrenagem que deverá ser adaptado para este funcionamento. Para situações de chuvas na escala de microdrenagem o escoamento continuará contribuindo para o rio principal, já para situação de um evento intenso de microdrenagem, o escoamento irá contribuir para o reservatório. Este reservatório foi dimensionado para armazenar toda a água de um tempo de retorno de 25 anos e, para situações extremas, foi previsto um sistema de vertimento para o rio principal.

A comunicação através de comporta unidirecional foi implementada no modelo pela ligação do tipo *Flap* (F) a ligação para o reservatório usou a ligação do tipo G2 (Galeria circular), e a ligação de vertedor da falha do reservatório para o rio usou a tipo V.

Para funcionamento do sistema em tempo seco, deverá ser implementado um poço de visita logo a montante do PV com extravasor de drenagem apresentado anteriormente. A lógica deste PV adicional é separar os escoamentos do tempo seco e as águas de esgoto misturadas com a contribuição pluvial de baixa intensidade, das águas de contribuição mista geradas em eventos pluviométricos de elevada intensidade. Dessa forma em tempo seco e em períodos de baixa precipitação as águas são direcionadas para um sistema de tratamento, representado neste caso por um *wetland* construído. Para chuvas de maior

intensidade oi dimensionado um vertedor no interior do PV que direciona os escoamentos para o PV com o extravasor.

A Figura 4-97 apresenta de maneira esquemática o poço de visita com vertedor para separação da contribuição em tempo seco e de baixas precipitações. A Figura 4-98 apresenta a localização do reservatório e de duas wetlands construídas necessárias para realizar o tratamento dos efluentes da sub-bacia piloto. O reservatório foi dimensionado com base nos resultados da simulação hidrodinâmica e os *wetlands* construídos com base nas informações levantadas no referencial teórico considerando 1 m² por habitante atendido. Análises do tratamento não foram desenvolvidas para o presente cenário.

Vale destacar que para implementação do reservatório, vistos os elevados volumes de água pluvial de contribuição, será necessário realizar o movimento de terra, escavando a região em cerca de 4 metros. O volume de escavação para os *wetlands* construídos será menor e dependerá da metodologia a ser definida em etapas de projeto posteriores a uma análise conceitual, à qual se limita a presente tese.

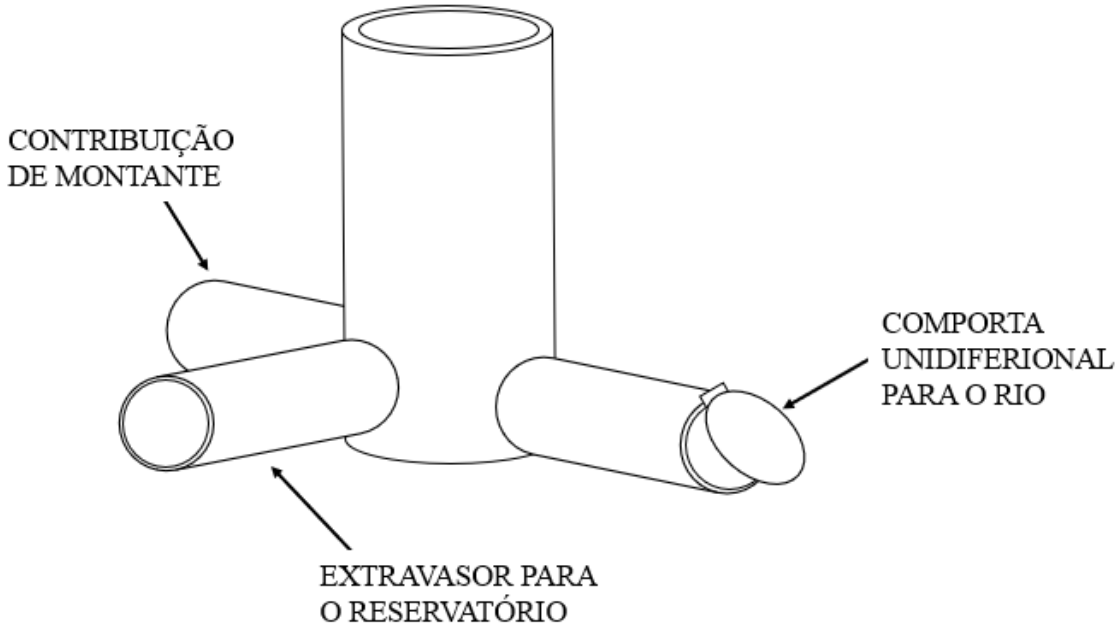

Figura 4-96. PV com extravasor para o reservatório e com comporta unidirecional para o rio de maneira a evitar a contribuição de jusante para montante do curso principal, bem como o seu remanso para TRs menores. Fonte: Elaboração própria.

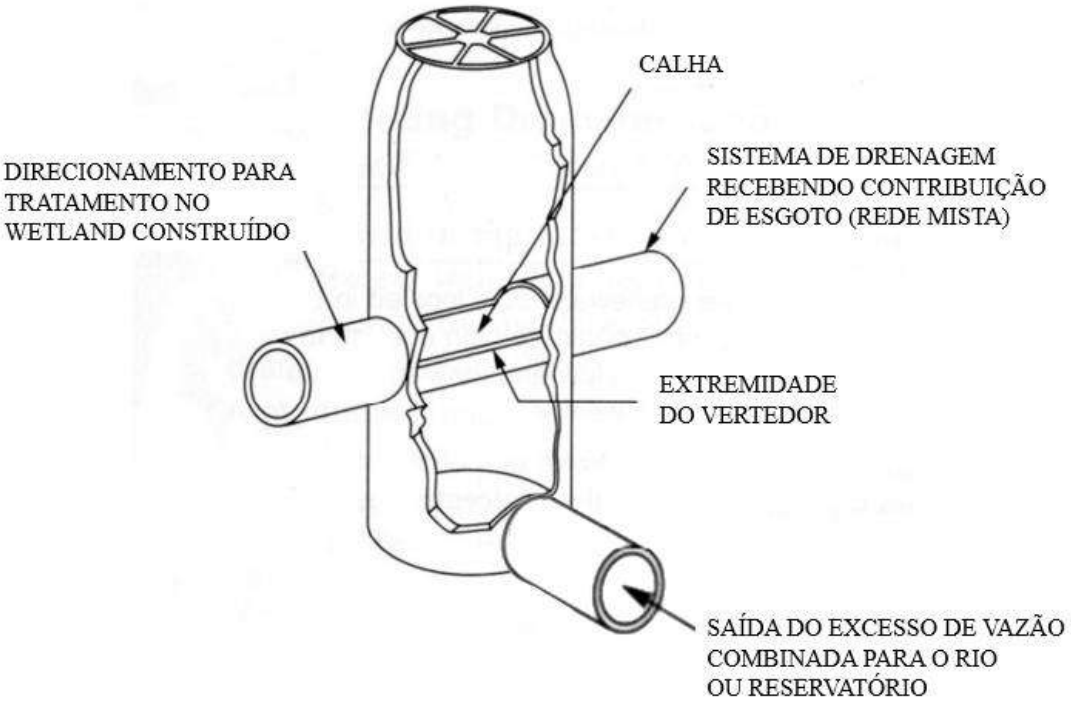

Figura 4-97. Representação do poço de visita com vertedor para separação da contribuição em tempo seco e de baixas precipitações.
Fonte: adaptado de Tchobanoglous e Burton, (1991) apud Madeira (2012).

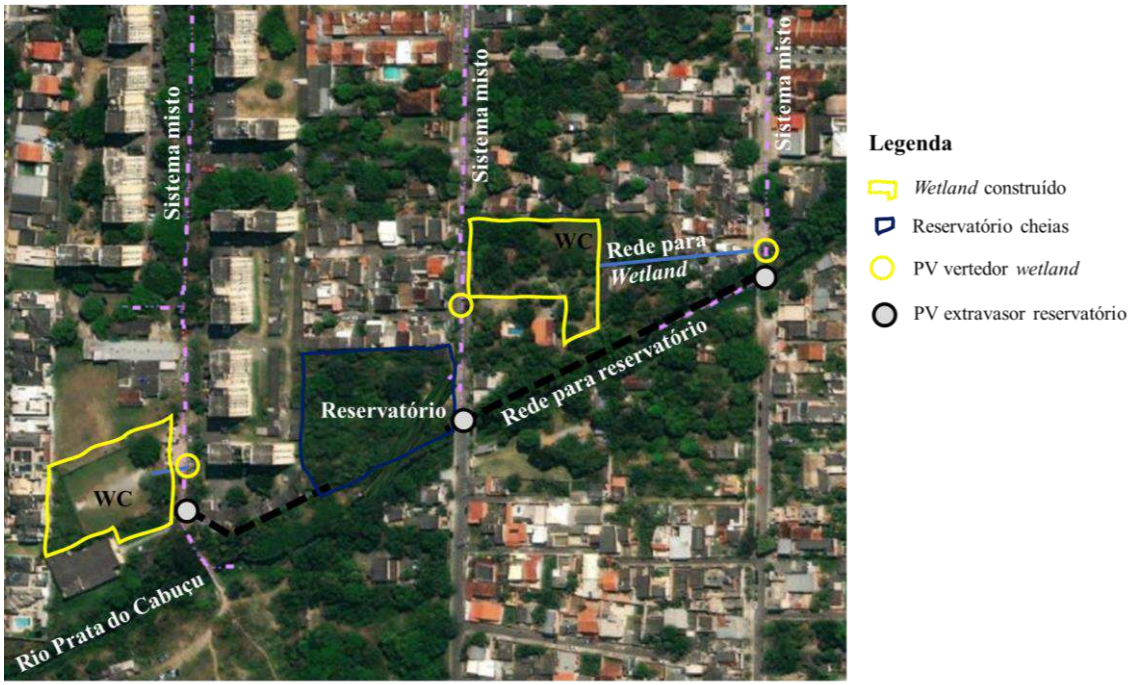

Figura 4-98. Representação esquemática do funcionamento do sistema integrado para melhoria do funcionamento dos sistemas de esgotamento sanitário e drenagem urbana.
Fonte: Elaboração própria.

Em relação aos resultados deste cenário de intervenção é possível observar que os escoamentos foram ordenados, tanto para a situação de tempo seco, como para a situação de eventos extremos.

A Figura 4-99, Figura 4-100 e Figura 4-101 apresentam os perfis de níveis máximos para o tempo de recorrência de 25 anos dos Sistemas 1, 2 e 3, respectivamente. É possível observar que na maioria dos trechos as redes funcionam a superfície livre. É verificado o funcionamento sob pressão de um curto trecho a jusante do Sistema 3. Este funcionamento sob pressão, porém, ocorre somente para situações críticas e apesar disso, não são verificados extravasamentos da rede na camada superficial.

Complementarmente, a Figura 4-102 apresenta a mancha de inundação para o cenário de correção do sistema. É possível observar que não há inundações não esperadas na camada superficial do escoamento, as únicas regiões de acúmulo de águas estão nos wetlands construídos e no reservatório de armazenamento temporário do volume de chuva.

Vale destacar que a determinação do melhor sistema de solução para a região deve levar em conta outros fatores não desenvolvidos na presente tese. Como apresentado pela NBR 9648/1986 a concepção da melhor solução dada ao ordenamento das águas residuais deve levar em conta não somente o ponto de vista técnico, como também o econômico, o financeiro e o social.

.

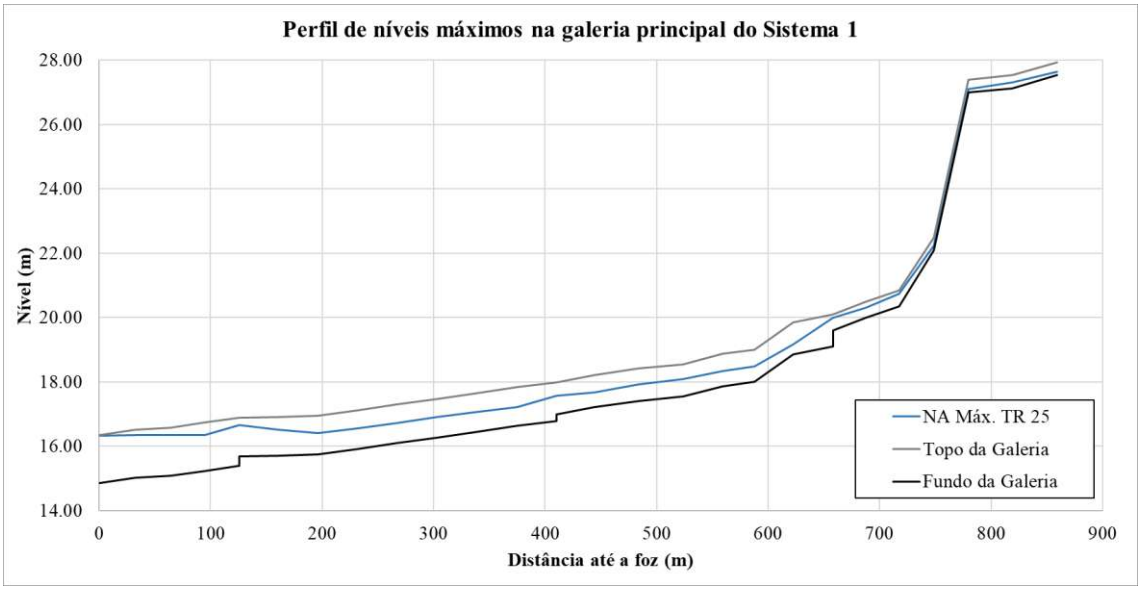

Figura 4-99. Perfil de níveis máximos do Sistema 1 para a situação de implementação de wetlands construída e reservatório de amortecimento de cheias diante de um evento de TR25. Fonte: Elaboração própria.

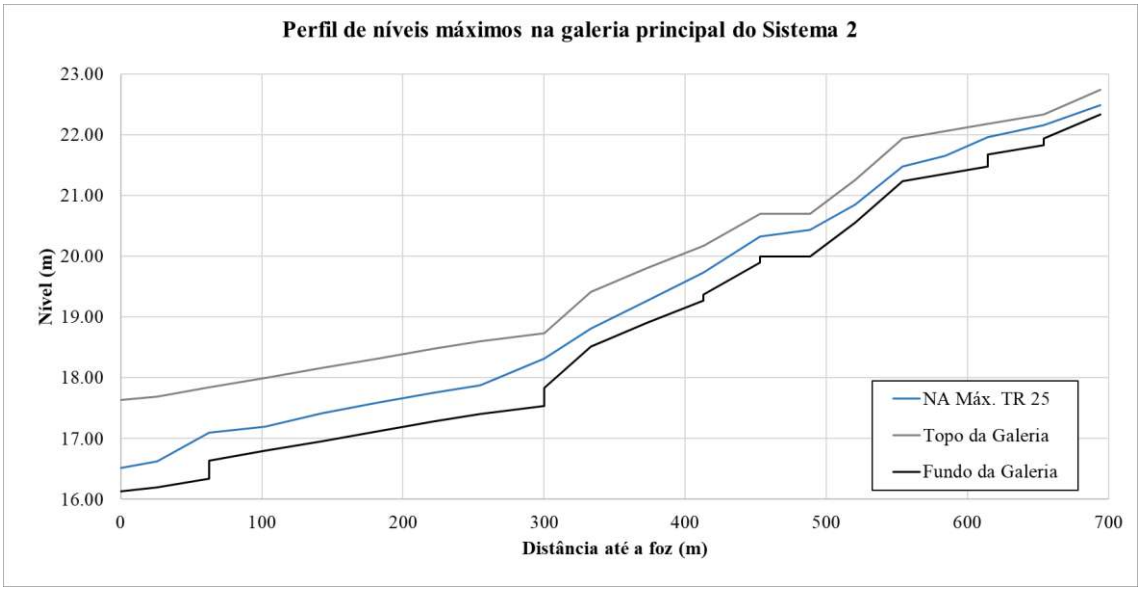

Figura 4-100. Perfil de níveis máximos do Sistema 2 para a situação de implementação de wetlands construída e reservatório de amortecimento de cheias diante de um evento de TR25. Fonte: Elaboração própria.

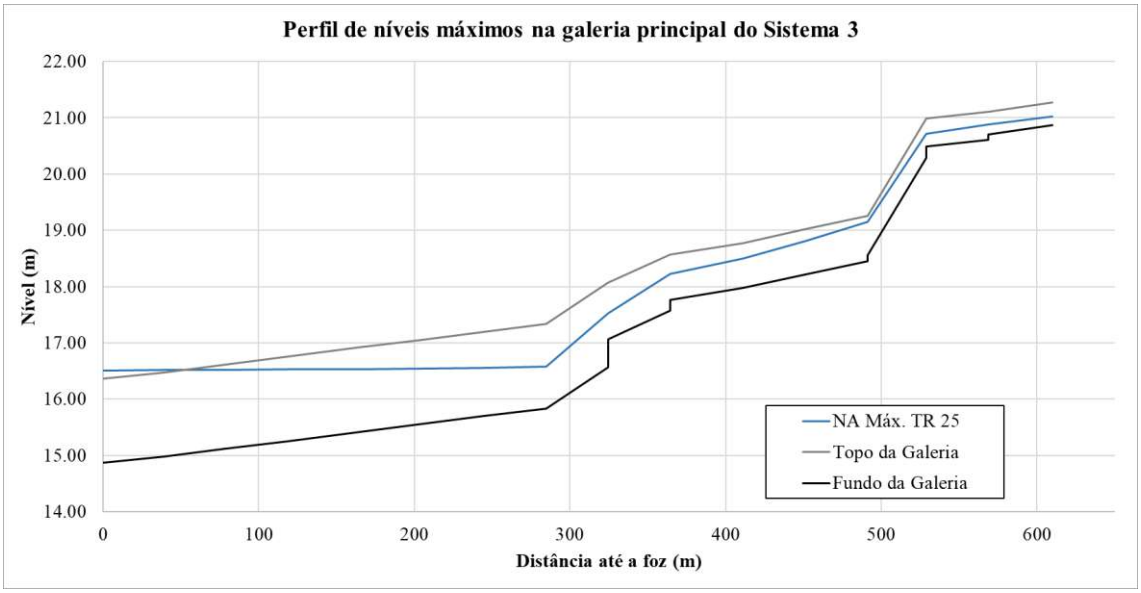

Figura 4-101. Perfil de níveis máximos do Sistema 3 para a situação de implementação de wetlands construída e reservatório de amortecimento de cheias diante de um evento de TR25. Fonte: Elaboração própria.

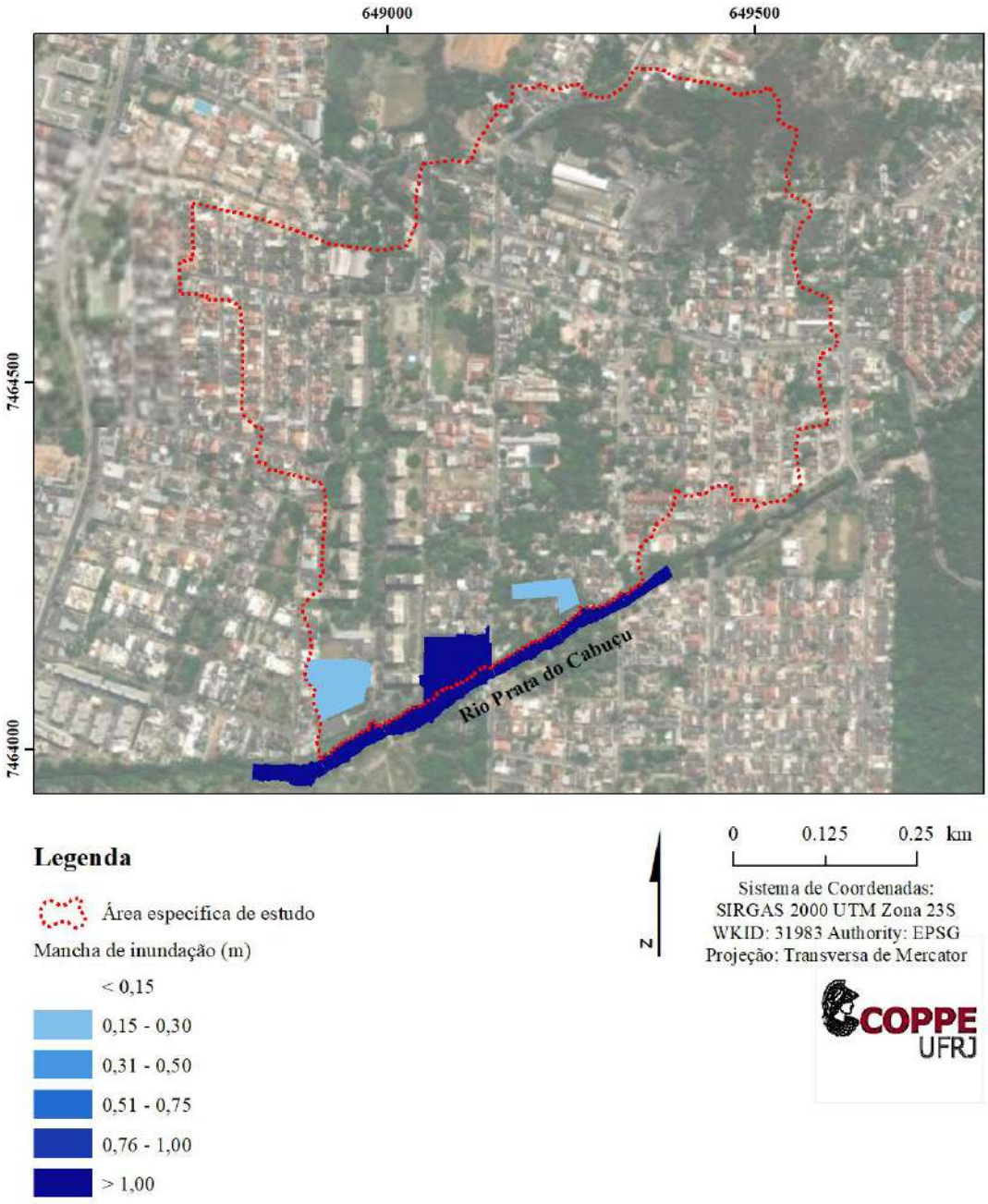

Figura 4-102. Mancha de inundação para o cenário de projeto para um evento de TR 25 anos.
Fonte: Elaboração própria.

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

5.1 Caso Real em Município do Norte do Brasil

O exemplo apresentado refere-se a uma aplicação prática da metodologia proposta em município brasileiro, fruto de consultoria técnico-científica desenvolvida por pesquisadores da UFRJ. De maneira a manter o sigilo da empresa contratante, informações mais específicas do caso não são informadas. Estas informações, porém, não impedem a verificação da aplicabilidade da metodologia para compreender e resolver o problema de interação entre os sistemas de drenagem e de esgotamento sanitário identificado.

A seguir serão apresentadas as etapas da metodologia desenvolvidas para o caso real em questão.

5.1.1 ETAPA 1 – Município da Região Norte

O exemplo que será apresentado teve por objetivo avaliar os impactos no SES causados por irregularidades no sistema de microdrenagem, utilizando os eventos hidrológicos do período de dados de transbordamentos ocorridos em uma Estação Elevatória de Esgotamento sanitário (EEE) do SES de um município da Região Norte do Brasil. Estes extravasamentos culminaram na ruptura do muro da EEE e em prejuízos para o meio ambiente com a contribuição de esgoto para o curso d'água localizado a jusante da estação (o curso d'água, por sua vez, não tem contribuição hidrodinâmica sobre o sistema). Tal avaliação permitirá identificar a participação de cada sistema (o de esgotamento sanitário e o de drenagem pluvial) no resultado final de alagamentos e espalhamento de águas residuais.

Para determinação dos eventos de precipitação intensa, utilizados nos cenários de simulação, foram as chuvas ocorridas no dia do desastre observado. Os dados meteorológicos foram extraídos do Sistema de Informações Hidrometeorológica (SIM) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). O hietograma de Figura 5-1 apresenta o evento hidrológico relativo ao dia da falha. É perceptível que devido a intensidade do evento não deveria haver falhas significativas na rede de microdrenagem, o que corrobora com a hipótese de que há, no SES, contribuições irregulares de águas pluviais diretamente

dos domicílios, ou contribuição pelo acúmulo de água nos logradouros devido ao mau funcionamento da rede de microdrenagem.

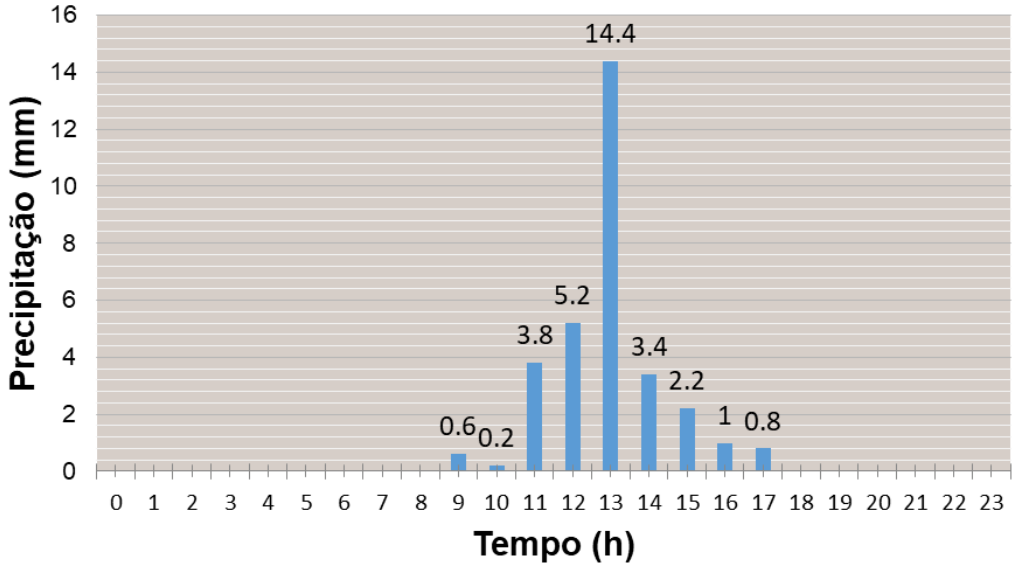

Figura 5-1. Hietograma do dia em que ocorreu o colapso da estrutura.
Fonte: INMET.

Devido à hipótese de mau funcionamento do sistema de microdrenagem, deverá ser simulado um cenário de funcionamento do sistema de microdrenagem para um evento de referência com TR10, no qual é esperado o funcionamento adequado do sistema. A chuva de referência foi construída utilizando uma equação de IDF desenvolvida para a região e considerando o tempo de concentração da bacia estimado em 60 minutos pela equação de George Ribeiro. A chuva de TR10 utilizada para verificação pode ser vista na Figura 5-2.

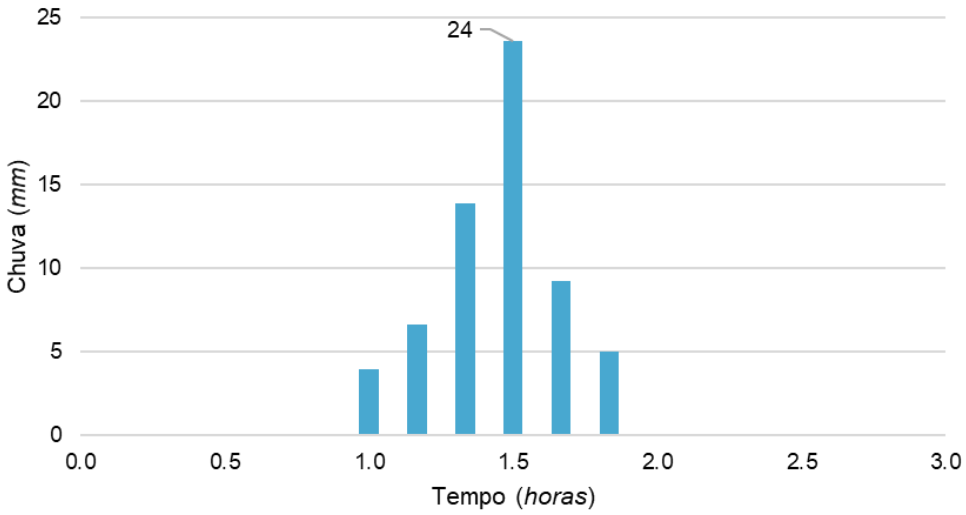

Figura 5-2. Evento de referência (TR10) para verificação do funcionamento do sistema de microdrenagem. Fonte: Elaboração própria.

A verificação hidráulica do sistema de microdrenagem ocorre, porque mesmo que não existam ligações irregulares entre as redes, os alagamentos podem contribuir para o SES pelas ruas, através dos poços de visita, ou pelas casas, através das singularidades de esgotamento domésticas.

Dessa maneira as possíveis interferências entre os sistemas são inicialmente estimadas. Serão consideradas, pela análise previa do problema, as seguintes possíveis interações já previstas no desenvolvimento da metodologia proposta:

1. Falta de manutenção ou mau funcionamento do sistema de drenagem; e
2. Contribuição parasitária do sistema de drenagem pluvial residencial.

Complementarmente, ainda na Etapa 1, foram definidos os contornos da bacia hidrográfica de microdrenagem e a bacia de esgotamento sanitário. Neste caso as delimitações não são iguais, devido à duas transposições de bacias de esgotamento que contribuem para o sistema em questão.

O problema será abordado até a Etapa 2 (Aplicação do MODCEL-SHIM), na qual será estimado o percentual de ligações prediais irregulares que contribuíram para o extravasamento da EEE (*CSO*), bem como representada a possível contribuição de águas pluviais ao sistema de esgoto pelos alagamentos. Devido à acordo de confidencialidade, mapas e localizações não poderão ser apresentados para este exemplo em questão.

5.1.2 ETAPA 2 – MODCEL-SHIM – Município da Região Norte

Como primeiro passo desta etapa foi preparada a base hidrodinâmica responsável pela representação dos escoamentos superficiais da região. Para esta etapa foram utilizadas informações planialtimétricas disponibilizadas pela prefeitura local.

Adicionalmente para a simulação da primeira camada subsuperficial, correspondente ao sistema de microdrenagem, foram utilizadas informações disponibilizadas pela concessionária local que correspondem ao levantamento cadastral de todo o sistema de microdrenagem existente.

Após a preparação do modelo hidrodinâmico responsável pela representação dos escoamentos superficiais e subsuperficiais pluviais, há a necessidade de calibração para bem representar a realidade existente, no que diz respeito à geração e acúmulo de escoamento pluvial. Para este problema não havia dados suficientes para calibração do modelo hidrodinâmico e, dessa forma, coeficientes de literatura foram utilizados para esta etapa de simulação.

O próximo passo da metodologia é a simulação dos elementos do SES. Para a representação da rede coletora de esgotamento sanitário, foram identificados os poços principais de passagem, representados através de células de escoamento para inclusão no MODCEL. Os poços de visita de esgoto sanitário foram conectados por ligações de galeria circular (G2), respeitando seu material e diâmetro. Outras estruturas relevantes ao SES também foram representadas com o MODCEL, como estações elevatórias de esgoto (EEE) localizadas a montante da bacia de esgotamento em questão.

Para a EEE à qual contribuem todos os esgotos da bacia de estudo (e que apresentou a falha), foram consideradas as capacidades operacionais de 132 L/s para a operação de uma bomba, e a capacidade máxima de 182 L/s para a operação em paralelo das duas bombas existentes na estação. Estas estruturas serão representadas no processo de simulação com ligações do tipo bombeamento (B).

Como condição de contorno o modelo utilizado contou com a afluência da vazão de esgoto, obtida com base na média mensal do volume de água micromedido, calculando uma vazão de esgoto para cada lote na área de contribuição, com taxa de retorno de 0,80.

Com o modelo MODCEL-SHIM preparado é possível simular contribuições irregulares da drenagem domiciliar nas redes de esgoto, além de possíveis contribuições por alagamentos, através dos poços de visita em via pública, ou através dos ralos das casas, para locais onde as profundidades superaram o nível da calçada e invadiram os domicílios.

Após a preparação da base de simulação foram definidos os cenários de simulação, apresentados na Tabela 5-1, para alcance dos objetivos.

O primeiro cenário se refere a uma situação básica, sem chuva, com objetivo de avaliar o funcionamento do sistema de esgotamento, sem interferências das águas pluviais.

O cenário 2 tem por objetivo a avaliação sob a influência de chuvas do SES, utiliza-se a chuva registrada no dia de ruptura da EEE. Para este cenário, serão simulados sub-cenários com alteração dos percentuais de contribuições parasitária dos sistemas pluviais domiciliares. O percentual de contribuição será calibrado pelo registro de operação das bombas da EEE.

Os sub-cenários apresentam a seguinte nomenclatura:

Cenário 2.0.0 – Cenário 2 com 0% de contribuição domiciliar parasitária;

Cenário 2.5.5 – Cenário 2 com 5% de contribuição domiciliar parasitária;

Cenário 2.10.10 – Cenário 2 com 10% de contribuição domiciliar parasitária;

Cenário 2.15.15 – Cenário 2 com 15% de contribuição domiciliar parasitária;

Finalmente, o cenário 3 corresponde à resposta das camadas frente a uma chuva de referência com TR 10 anos. Para este cenário serão simulados dois sub-cenários representando uma situação de 0% de contribuições parasitárias domiciliares e outra simulação representado o percentual definido como sendo o de maior probabilidade das contribuições parasitárias existentes na região, obtido da simulação e calibração do MODCEL-SHIM para o Cenário 2.

Tabela 5-1. Resumo dos Cenários de Simulação. Fonte: Elaboração própria.

Cenário 1
Sem chuva, na situação atual do SES.
Cenário 2
Com a chuva registrada são simulados vários cenários para representar os percentuais de ligações irregulares (0%, 5%, 10% e 15%). É utilizada a situação atual de aporte de esgoto do SES.
Cenário 3
Com a chuva de TR10 são simulados dois cenários (um com 0% de ligações irregulares e outro com o percentual máximo provável de ligações irregulares).

Como principal resultado do Cenário 1, foi obtida a vazão de esgoto afluente à EEE. Esta simulação teve como objetivo verificar o funcionamento do SES sem o aporte de águas pluviais e, ao mesmo tempo, calibrar a afluência de esgoto à EEE, calculada pelo modelo matemático.

Diante das premissas utilizadas, foi obtido um valor de 71,3 L/s de vazão de esgoto afluente à Estação Elevatória, não sendo verificada nenhuma falha no dimensionamento da rede do sistema. O valor obtido como resultado do Cenário 1 encontra-se dentro do intervalo calculado pela concessionária e disposto em relatório técnico.

Os resultados do Cenário 2 levaram em consideração o evento de chuvas intensas que culminaram na ruptura do muro da EEE, variando o percentual de contribuições irregulares da drenagem predial na região que contribui diretamente para a estação. Contribuições pluviais pela entrada nos PVs de esgotamento, nas ruas e calçadas, ou pelos ralos, nas residências, são levadas em consideração neste cenário. Logo, o cenário 2 tem a função de estimar o percentual provável de ligações prediais irregulares no SES que ocasionaram o CSO (Combined Sewer Overflow). Aqui é realizada uma comparação entre os resultados simulados e o volume estimado dos extravasamentos ocorridos na EEE, bem como o momento em que ocorreram.

Os resultados da vazão afluente à EEE para os cenários de 0%, 5%, 10% e 15% de contribuições irregulares prediais podem ser vistos na Figura 5-3, Figura 5-4, Figura 5-5 e Figura 5-6, respectivamente.

Pela análise da operação da EEE durante o evento, apresentada nos gráficos, é possível estimar que entre as horas 9 e 14 ocorreu a estação recebeu mais que a capacidade de suas duas bombas funcionando em paralelo (182 L/s). Isto culminou no extravasamento não controlado das águas pluviais e residuais e na ruptura do muro da EEE.

Para variar estes percentuais no modelo foi realizada uma estratégia de simulação que permitiu que os telhados e pátios das edificações pudessem contribuir para qualquer sistema de infraestrutura adjacente, conforme apresentado no capítulo 4. Para os casos regulares contribuem para o sistema de drenagem ou para os casos irregulares contribuem para o sistema de esgotamento.

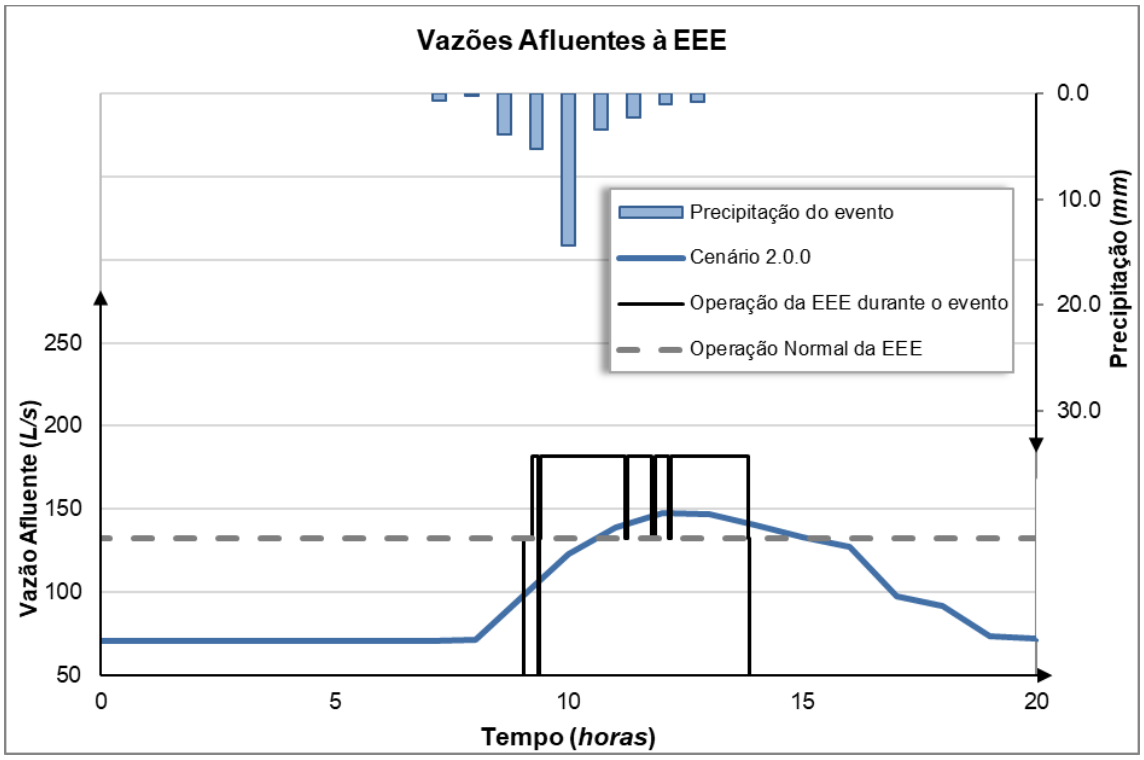

Figura 5-3. Vazões afluentes à EEE para o Cenário 2 com 0% de conexões irregulares.
Fonte: Elaboração própria.

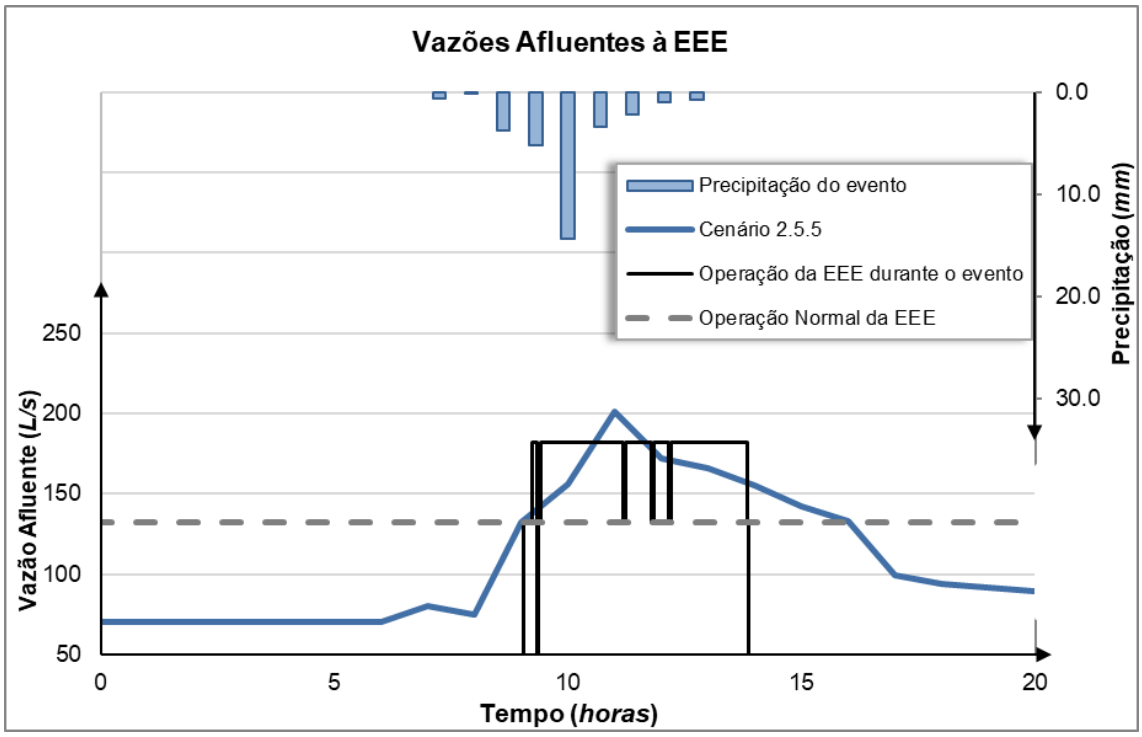

Figura 5-4. Vazões afluentes à EEE para o Cenário 2 com 5% de conexões irregulares.
Fonte: Elaboração própria.

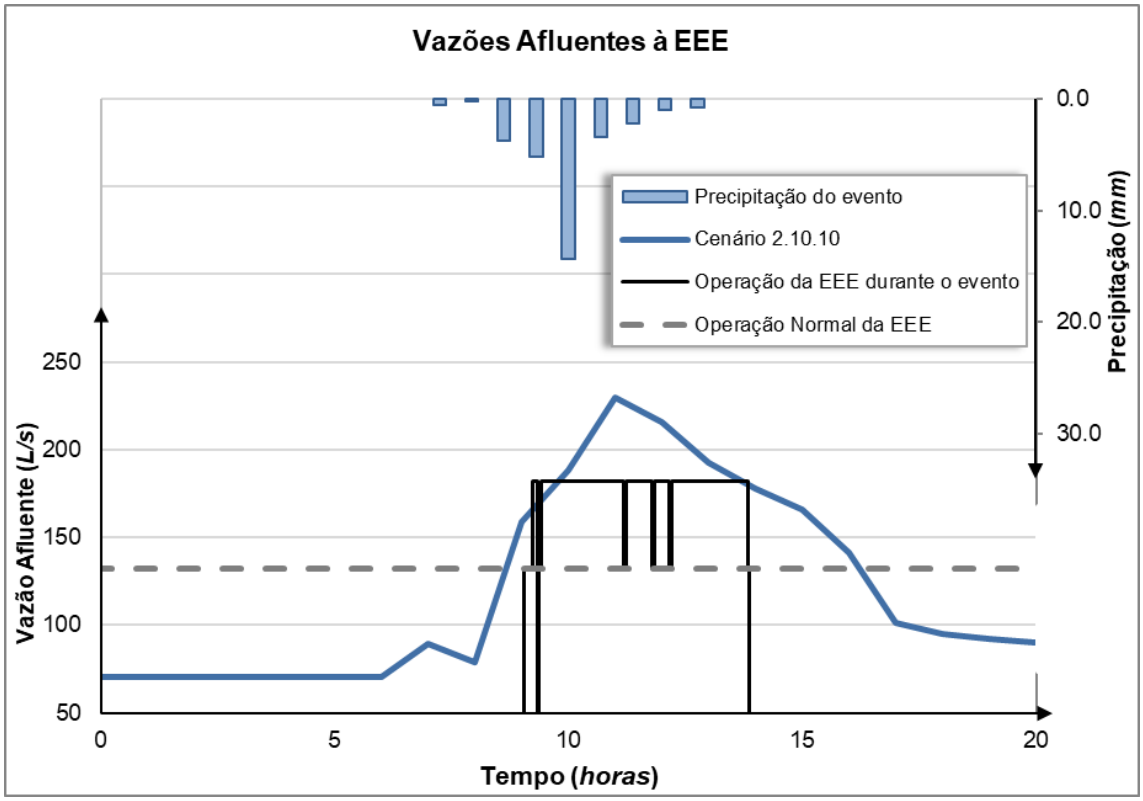

Figura 5-5. Vazões afluentes à EEE para o Cenário 2 com 10% de conexões irregulares.
Fonte: Elaboração própria.

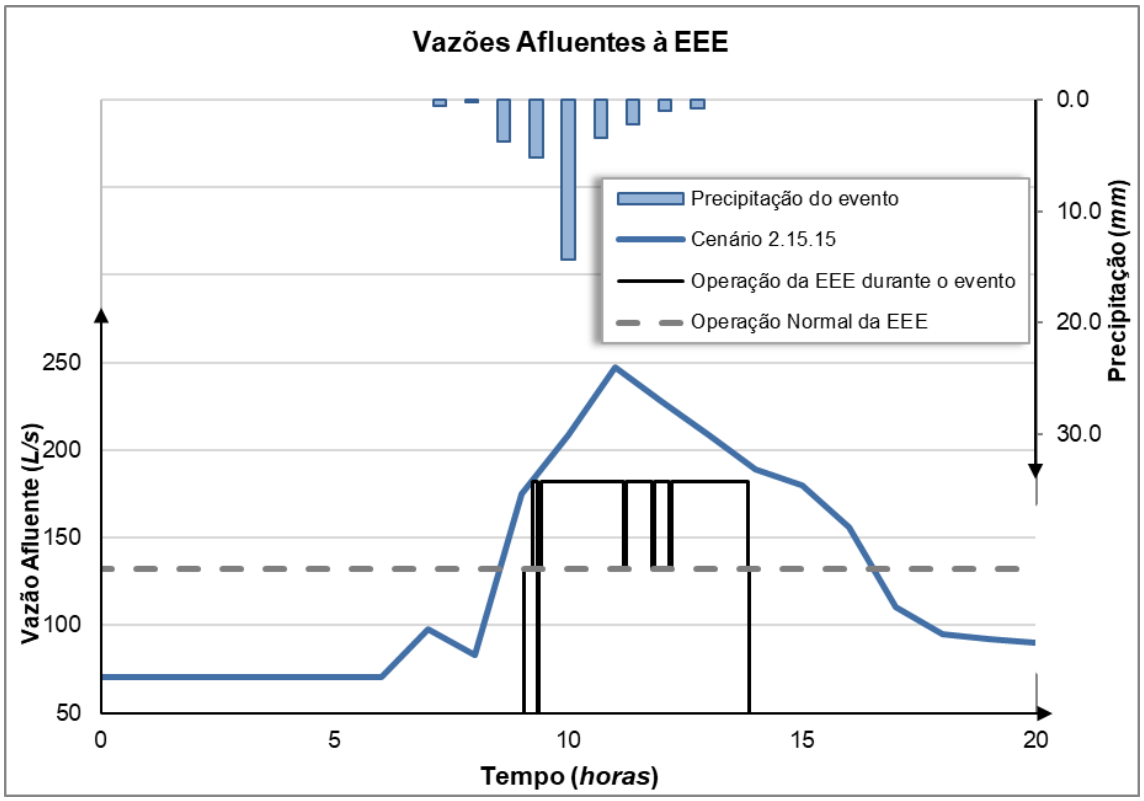

Figura 5-6. Vazões afluentes à EEE para o Cenário 2 com 15% de conexões irregulares.
Fonte: Elaboração própria.

No Cenário 2 com 0% de ligações irregulares, pode-se perceber que a vazão afluente gerada pelo evento pluviométrico registrado no dia de ruptura da EEE não iria resultar em extravasamentos na estação, uma vez que a vazão afluente é menor do que a capacidade das duas bombas da EEE funcionando em paralelo. Este cenário apresenta um pico de vazão de 147,55 L/s. Note que esta vazão já ampliada, mas dentro da capacidade da estação, provém de falhas da microdrenagem, que gerando passagem de água sobre as ruas e eventual alagamento nas casas, permite entrada indesejada de água no sistema de esgotamento.

Para o Cenário 2 com 5% de ligações irregulares, nota-se que o pico das vazões afluentes (201,29 L/s) ultrapassa a capacidade de operação das duas bombas, porém o volume excedente é relativamente modesto, possivelmente ainda não sendo capaz de gerar falha por extravasamento que ocasionasse a ruptura do muro da EEE.

Os resultados da simulação matemática do Cenário 2 com um percentual de 10% de ligações irregulares apresenta uma curva de vazões afluentes com volume e pico (230,00 L/s) suficientes para que ocorresse a falha na estação por extravasamento e, possivelmente, a ruptura do muro da EEE.

O Cenário 2 com 15% de ligações irregulares gerou resultados de vazão afluente à EEE que ultrapassam em um grande período as vazões de capacidade máxima das bombas. Dessa maneira, esta configuração de irregularidades pode ter gerado, facilmente, as falhas por extravasamento na estação e, consequentemente, a ruptura do seu muro. Este valor de irregularidades nas ligações domiciliares é a envoltória máxima dos percentuais de conexões irregulares prováveis, posto que um maior número de ligações iria gerar extravasamentos provavelmente superiores aos observados no dia do evento de ruptura. Tal cenário apresenta um pico de vazões de 247,56 L/s, 36% maior do que a capacidade máxima da estação.

O Cenário 3 apresenta resultados do comportamento do SES afluente à EEE frente a uma chuva de referência para dimensionamento de redes de microdrenagem (TR10). Para tanto, foram utilizadas, separadamente, as configurações de 0% e 15% de ligações irregulares. O percentual de 15% foi definido como limite superior da faixa provável de percentuais de ligações parasitárias domiciliares.

O objetivo foi avaliar o comportamento da rede e estação elevatória de esgotos, em presença de um evento que deveria ser captado, conduzido e descarregado em segurança por uma rede funcional de microdrenagem. A simulação com 0% de ligações irregulares apresentou uma vazão afluente à EEE de 249,09 L/s, que ultrapassa em 37% a capacidade da estação com o funcionamento de duas bombas funcionando em paralelo (182,00 L/s). Alterando a porcentagem de contribuições irregulares para 15%, a vazão afluente máxima é de 293,3 L/s para a EEE, ultrapassando em 60% a capacidade máxima das bombas da estação.

Os resultados obtidos no Cenário 3 indicam que a correção das ligações irregulares não é suficiente para evitar que existam extravasamentos na EEE, tendo em vista que o sistema de drenagem, inadequadamente dimensionado e/ou com cobertura espacial incompleta, falha para a chuva de referência de TR10.

Diante dos resultados obtidos, é possível enfatizar que:

- O SES da região mostrou funcionamento adequado na modelagem matemática, quando isento de contribuições de águas pluviais. Em presença de contribuição pluvial o sistema de esgotamento sanitário coloca-se em risco e falha. É proposta a instalação de um extravasor como dispositivo complementar, que permite ordenar possíveis falhas do

sistema, para preservação da população local, e do meio ambiente, quando este sistema é submetido a águas pluviais que provêm de falha ou inexistência do sistema de microdrenagem. A verificação da qualidade das águas do corpo hídrico receptor pode ser verificada pela implementação da Etapa 3 da metodologia proposta.

- O modelo matemático assume hipóteses na tentativa de compreender e representar a realidade criando correlações físicas que amarram causa e consequência e que permitem análises mais balizadas, ainda que não 100% precisas. Dessa maneira, é esperado que o real valor do percentual de ligações irregulares esteja dentro da envoltória estimada de 10 a 15%, com pequenas variações.

- No cenário 2 com 0% de ligações irregulares das águas pluviais no SES, as contribuições vindas pelas tampas de poço ou por alagamento no interior das casas não seriam suficientes para sobrecarregar o sistema da EEE. Percebe-se aqui que a chuva registrada no dia de ruptura do muro da EEE não foi crítica, sob a ótica da drenagem superficial, tendo gerado poucos alagamentos.

Porém, não foi o ocorrido e o extravasamento deste dia levou ao colapso do muro da estação. Esse volume adicional tem sua origem provável nas ligações diretas irregulares. Para essa representação, o Cenário 2 que apresenta 15% de ligações irregulares no sistema de esgotamento, configurando uma envoltória superior, que justifica a falha na EEE.

Percebe-se com o Cenário 3 com 0% de ligações irregulares que, considerando a chuva de referência usualmente utilizada em projetos de microdrenagem, referente a um tempo de recorrência de 10 anos, mesmo que todas as ligações irregulares fossem mapeadas e corrigidas, o sistema falharia por influência das lacunas no projeto e implantação da rede de drenagem, que não deveria interagir com a rede de esgotamento sanitário em um sistema separador absoluto. Cabe ainda ressaltar, que, neste caso, o extravasor ordena os escoamentos associados à falha da EEE, mas a rede do sistema de esgotamento, em si, sofre e falha significativamente, com extravasamento de vários poços de visita, motivada pelo excesso de águas pluviais.

Desta forma, a aplicação da Etapa 1 (Definição das bacias urbanas e da Metodologia a ser aplicada) e da Etapa 2 (Desenvolvimento do MODCEL-SHIM) apresentada pela presente tese mostraram-se satisfatórias para aplicação neste problema de diagnóstico.

Algumas particularidades surgiram no problema em questão, como a necessidade de utilizar coeficientes de literatura para o modelo hidrodinâmico pela falta de dados para calibração, e a possibilidade de poder alterar a contribuição da drenagem predial de certas edificações, ora para o sistema de drenagem, ora para o sistema de esgotamento.

Para este exemplo, poderão ainda ser exploradas em trabalhos futuros as etapas 3 e 4 da metodologia. Dessa forma, poderá ser verificado o impacto da qualidade das águas que extravasaram na EEE (Etapa 3) e possíveis soluções para o CSO observado (Etapa 4).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia desenvolvida na presente tese para simulação integrada das redes urbanas de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário se apresentou como uma ferramenta útil para a representação de possíveis casos de interferências cruzadas. A simulação em multicamadas proposta, utilizando o MODCEL-SHIM, foi capaz de simular cenários de interferência entre as três camadas de escoamentos representadas, sendo elas a camada superficial do escoamento (ruas, lotes, espaços livres e rios), e as camadas de galerias subterrâneas dos sistemas de drenagem e esgotamento sanitário.

A metodologia proposta tem o potencial de ser aplicada de forma prática na interpretação e diagnóstico de problemas cruzados entre os sistemas de drenagem e de esgoto, bem como no prognóstico de funcionamento de novas composições destas redes, fornecendo subsídio para tomada de decisões a respeito dos melhores caminhos para tratar, de maneira integrada, as águas urbanas. O tratamento integrado não se refere exclusivamente a um sistema unitário, mas sim que os sistemas sejam pensados em conjunto de maneira a aproximar as etapas de estudos e projetos da realidade vivenciada na prática nos ambientes urbanos, permitindo a antecipação de problemas

Para facilitar a replicabilidade da metodologia, quatro etapas de aplicação foram desenvolvidas. A Etapa 1 diz respeito a análises preliminares importantes para a construção dos modelos matemáticos e, seu desenvolvimento adequado, possibilita que os modelos construídos apresentem resultados mais representativos da realidade, além de mitigar retrabalhos, principalmente em relação à reinterpretação e levantamento adicional de dados primários após etapas subsequentes. A Etapa 2 diz respeito à aplicação do MODCEL-SHIM para as 3 camadas de simulação propriamente ditas. A Etapa 3 representa as análises de qualidade da água utilizando um modelo simplificado, com foco na concentração de DBO, que utiliza como base as equações de Streeter-Phelps e os resultados hidrodinâmicos da Etapa 2. Por último, na Etapa 4, são simuladas soluções para os problemas identificados nas Etapas 2 e 3.

De maneira a confirmar as hipóteses de aplicabilidade da metodologia, a ferramenta foi aplicada em um estudo de caso exploratório localizado na bacia dos Rios Piraquê-Cabuçu, na cidade do Rio de Janeiro. Esta é uma área urbana em expansão, sujeita a fortes

interações não planejadas entre o sistema de esgotamento sanitário e o sistema de drenagem urbana.

Assim, depois de definida uma área urbana em expansão com ocupação relativamente já avançada dentro da bacia em questão, cinco possíveis interações entre os sistemas e seus impactos nas três camadas de representação dos escoamentos foram simuladas. As simulações não necessariamente correspondem a problemas observados na sub-bacia escolhida como piloto para desenvolvimento da metodologia, mas correspondem a problemas de interação observados na prática em diversas regiões urbanas. O objetivo principal destes cenários de interação é explorar todas as possibilidades e potenciais aplicações da ferramenta, bem como entender suas limitações.

As três camadas de escoamento foram construídas utilizando um MDT da região. Vale destacar que os sistemas de drenagem e esgotamento sanitário não consideraram as redes de fato existentes no local, por falta de informações, porém, foram incorporadas na área, redes tradicionalmente dimensionadas. Esta simplificação foi necessária para o desenvolvimento das simulações, apesar de não representar a realidade. Apesar disso, destaca-se que o modelo é capaz de representar as redes mesmo em situação de falha por mau dimensionamento, caso as considerações de dimensionamento aqui realizadas sejam mais favoráveis para o funcionamento dos sistemas do que as observadas na prática. O sistema de microdrenagem por exemplo, apesar de apresentar sinais de superdimensionamento, teve, nos cenários de possíveis interações, sua capacidade reduzida pela falta de manutenção.

A primeira simulação de interações diz respeito a ausência de um sistema de microdrenagem no território. Apesar de não corresponder a uma situação corriqueira, há casos em que determinados territórios implementaram, primeiramente, o sistema de esgotamento sanitário, para depois implementar o sistema de drenagem. Isto corresponde a uma falha conceitual, uma vez que o sistema de drenagem configura uma infraestrutura estruturante do território e a sua ausência, ou falha sistêmica, causa impactos sobre os demais sistemas urbanos, podendo interromper por completo o funcionamento de todos eles. Além disso, este cenário pode corresponder à simulação de um sistema de drenagem que, por falta de manutenção, colapsou e não é capaz de cumprir sua função de captar e conduzir em segurança as águas pluviais até o exutório. Os resultados apresentados para este cenário de falha mostram fortes impactos sobre o sistema de esgotamento sanitário,

principalmente em relação ao incremento de vazão na ETE, causado pela infiltração das águas pluviais na rede de esgotamento sanitário. Além disso, são observados diversos extravasamentos de PVs de esgoto no território, degradando o ambiente construído e aumentando as chances de proliferação de doenças de veiculação hídrica. Vista a sua criticidade, este cenário foi também utilizado para aplicação da Etapa 3 da metodologia, cujas considerações finais são apresentadas mais adiante.

Para a seguinte possível interação, é necessário destacar que a sub-bacia piloto, localizada às margens do rio Prata do Cabuçu, tem um trecho no qual o rio apresenta capacidade hidráulica adequada para a contribuição das cheias fluviais, levando em conta os tempos de retorno de 10 e 25 anos. A escolha por este local se mostrou adequada, uma vez que o objetivo inicial do trabalho era interagir as redes de microdrenagem com as redes de esgotamento sanitário. Porém, diante da necessidade de representar o extravasamento do rio principal, que corresponde a uma realidade comum em diversos territórios urbanos, foi acrescido um cenário de falta de manutenção dos sistemas de drenagem, considerando as redes de microdrenagem e suas singularidades, bem como a falta de desassoreamento e limpeza do sistema de macrodrenagem principal (Rio Prata do Cabuçu). Diante das considerações realizadas no modelo, as simulações indicaram extravasamento do rio principal ocupando a rua que coincide com o talvegue central da sub-bacia. Este extravasamento é crítico sob o ponto de vista das infraestruturas críticas da região piloto, afetando significativamente a cidade e suas funções para a sociedade. Sob o ponto de vista do sistema de esgotamento sanitário, os extravasamentos invadiram a estação de tratamento proposta, o que na prática iria inviabilizar o processo de tratamento e dispersar diversos contaminantes pelas regiões inundadas.

O terceiro cenário de simulação representa a ausência total de um sistema de esgotamento sanitário. Este cenário corresponde à realidade de diversas cidades brasileiras, uma vez que, segundo o SNIS (2021), apenas 63,2% da população urbana do país é atendida por rede de esgoto. Para este cenário, as redes de drenagem funcionam como condutos do sistema de esgotamento sanitário, correspondendo a uma situação crítica para o meio ambiente, com forte potencial de degradação do corpo d'água receptor.

O próximo cenário trata de uma expansão urbana hipotética em determinado ponto do sistema de esgotamento sanitário. A ideia principal deste cenário é mostrar o potencial de aplicação da metodologia para determinar o quanto a rede de esgoto pode receber de

contribuição adicional sem falhar. Além disso, na etapa de busca de soluções, alternativas podem ser pensadas para um cenário adverso de expansão urbana que incorporem tratamentos locais para compensar o excesso de esgoto sanitário, não considerado no projeto inicial do sistema.

Por último, foram simulados diversos cenários de contribuição parasitária das redes de drenagem pluvial domiciliar para o sistema de esgotamento sanitário. Os resultados permitiram observar uma relação exponencial entre o percentual de contribuições parasitárias e o aumento na vazão afluente à ETE, para este sistema específico. O comportamento desta relação deve ser verificado por uma extensiva aplicação da metodologia em diversos sistemas, prioritariamente em casos reais. Este cenário também apresenta a criticidade desta interação para um sistema de tratamento não previsto para funcionar com esta distorção.

Na sub-bacia do Norte do Brasil simulada, foi possível estimar a faixa de domicílios que contribuem com águas pluviais para o sistema de drenagem e a quantidade de água que contribui para o sistema de esgotamento pelos alagamentos ocasionados por um subdimensionamento da rede de microdrenagem. A análise futura da qualidade de água dos extravasamentos das águas combinadas é importante para medir os impactos das falhas sobre o ambiente urbano e natural. Além disso, estruturas extravasoras poderão ser propostas de maneira estratégica no sistema, de modo que os impactos gerados pela interação entre as águas pluviais e residuais sejam mitigados.

Para aplicação da Etapa 3, como citado anteriormente, foi escolhida a interação ocasionada pela falha completa ou ausência do sistema de microdrenagem. A escolha por este cenário levou em conta a criticidade da contribuição das águas pluviais no sistema de esgotamento sanitário e os seus extravasamentos sobre as camadas superficiais, entendendo-se como situação de maior impacto negativo potencial. Apesar de serem observadas contribuições pluviais no cenário de falta de manutenção no sistema de micro e macrodrenagem, os extravasamentos fazem com que os contaminantes sejam mais diluídos, representando uma situação menos crítica no que diz respeito à qualidade das águas e mais crítica em relação a quantidade de água. Além disso, para o cenário de extravasamento do rio, as conexões funcionam todas sob uma superfície de inundação, o que dificulta o mapeamento do sentido do escoamento entre as camadas, pela mudança de sentido constante dos vetores de ligações hidráulicas. Assim, a aplicação da Etapa 3

para este cenário permitiu observar a criticidade das concentrações de DBO nas diversas camadas simuladas. Ademais, vale destacar a utilidade da ferramenta para mapeamento de concentrações de contaminantes no território, de maneira espacializada, utilizando uma ferramenta baseada em um modelo de células de escoamento, de mais fácil aplicação, mesmo para cenários de falta de dados, característicos da realidade brasileira. A representação, mesmo que simplificada, leva em conta os principais fenômenos físicos envolvidos na simulação de poluentes, com destaque para a possibilidade de integração entre águas inicialmente contaminadas com diversas concentrações, como as águas fluviais, os esgotos domésticos (e possivelmente industriais), bem como a água de primeira lavagem de chuva (ou *first flush*) e a alteração de sua concentração no decorrer do evento.

Para a Etapa 4, a solução adotada leva em conta duas situações: a inexistência de um sistema de esgotamento sanitário, provavelmente correspondente à realidade observada na bacia piloto, e a necessidade de proteger a rede de microdrenagem da elevação do rio principal; bem como, no outro sentido, proteger o rio principal da contribuição de um sistema misto, no qual escoam águas pluviais e esgoto sanitário mescladas. Outras soluções poderiam ser exploradas utilizando a ferramenta proposta, porém, esta alternativa de solução parte do potencial mais relevante da interação entre as três camadas, com a utilização da camada superior para resolver questões nas camadas inferiores. Os resultados permitem observar um correto funcionamento do sistema de drenagem, uma vez que, utilizando os espaços livres dentro da sub-bacia, ainda é possível reservar os escoamentos superficiais gerados. Além disso, o uso de *wetlands* construídas serve de complemento para utilização da camada superficial como solução local do sistema de esgotamento sanitário.

Portanto, a avaliação da potencialidade da metodologia usando a bacia piloto permite considerar que a ferramenta é, além de inovadora, útil para simulação do processo de interação entre as diferentes águas urbanas e suas concentrações de poluentes.

Em relação ao cenário real simulado, foi necessário simular de maneira combinada duas interações exploradas separadamente na bacia piloto. Isto permitiu a verificação de mais uma possibilidade de aplicação da metodologia. Assim, a simulação da contribuição de águas pluviais pelos tampões dos PVs de esgoto e pelas singularidades do sistema de esgotamento domiciliar, ocasionada pelos alagamentos, foi realizada em complemento a

possíveis cenários de contribuição parasitária das redes pluviais dos domicílios, ocasionados por conexões diretas ao sistema de esgotamento sanitário. Além disso, para este cenário foi necessário implementar as redes existentes, uma vez que existia o cadastro, e, analisando os resultados, verificou-se subdimensionamento da rede de microdrenagem.

De maneira prática, a metodologia auxiliou a diagnosticar corretamente um sistema de funcionamento complexo, com as representações adequadas dos principais fenômenos envolvidos, permitindo a elaboração de parecer técnico informando as causas mais prováveis dos eventos de colapso do sistema

Como principal limitação da metodologia apresentada, destaca-se a limitação territorial de aplicação da ferramenta. Devido ao elevado grau de discretização das células de escoamento, necessário para compatibilizar ruas, lotes e telhados com poços de visita de drenagem e esgoto, é necessário um intensivo e minucioso processo de interpretação e divisão do território nas células que serão aplicadas no modelo, bem como as diversas ligações realizadas nas 3 camadas e entre elas, verticalmente. Levando em conta apenas a sub-bacia do Sistema 1, que teve representação do sistema de esgotamento sanitário, foi necessário em uma área de 0,15 km² dividir 527 células de escoamento e implementar 833 ligações de forma manual, apresentando uma densidade de 1 célula a cada 285 m². Esta limitação, porém, também é observada nas metodologias tradicionais de dimensionamento de redes de saneamento.

Além disso, na bacia no Rio Piraquê-Cabuçu, bem como em áreas em expansão, a aplicação da metodologia se apresenta, potencialmente, como uma importante ferramenta no que diz respeito a dimensionar os sistemas de drenagem e de esgotamento sanitário, prevendo possíveis falhas que podem ocorrer pelas suas interações, previamente ao processo de urbanização ou de expansão da cidade. Dessa maneira, sistemas mais resilientes aos impactos negativos da ocorrência de chuvas extremas podem ser propostos. Regiões ainda em crescimento apresentam espaços livres onde soluções para ambos os setores podem ser pensadas. Estas soluções, além do caráter multifuncional, precisam levar em conta os conceitos de soluções baseadas na natureza (SBN) e WSUDS apresentados, que permitirão não apenas reduzir os impactos negativos das falhas dos sistemas de escoamento de águas pluviais e residuais, mas também garantir a existência

e impulsionar a biodiversidade dentro do ambiente urbano, trazendo uma gama de serviços ecossistêmicos para a sociedade.

Por fim, é importante ressaltar que não existe cidade ideal, onde não há ocupação ilegais, ou conexões clandestinas. As cidades não cresceram de forma planejada e controlada (ao menos, de forma adequada e previsível) e pensar em alternativas ao sistema separador absoluto (que na prática funciona como sistema misto) é fundamental para encontrar soluções que melhorem a qualidade urbana e o estado dos corpos d'água.

Como recomendações para trabalhos futuros, vale destacar as seguintes etapas complementares à presente proposta metodológica:

1) Simulação de diversos casos reais, de preferência para bacias com dados para calibração e validação, de maneira a tornar a ferramenta proposta mais robusta e consolidar a metodologia no que diz respeito à representação de células, às conexões entre células e diferentes camadas, bem como os parâmetros utilizados na etapa de simulação da qualidade da água;

2) Explorar simulações conjuntas de mais de um tipo de possíveis interações entre os sistemas, assim como feito para o município do Norte do Brasil;

3) Estender as simulações do modelo de qualidade de água para outros cenários de possíveis interações entre os sistemas;

4) Estender a modelagem de qualidade para outros tipos de contaminantes, levando em conta principalmente OD e coliformes;

5) Estudar os benefícios sobre os resultados da incorporação de modelagem avançada do OD, considerando situações de anaerobiose, da sedimentação da matéria orgânica, do consumo de OD pelo processo de nitrificação, e a consideração de cargas difusas sem vazão que correspondem especificamente à demanda de oxigênio do sedimento, o processo de fotossíntese e de respiração.

6) Propor a incorporação de um módulo de simulação de qualidade da água na ferramenta de modelagem utilizada, MODCEL, trazendo mais agilidade no processo de simulação dos cenários;

7) Elaboração de um manual metodológico consolidado para tratamento integrado dos sistemas de drenagem urbana e esgotamento sanitário a partir dos subsídios apresentados na presente tese;

8) Realizar ensaios em bacias experimentais para obtenção de parâmetros de contaminante por precipitação, parâmetros de infiltração/evapotranspiração/rugosidade, coeficientes de Manning de diferentes topologias de WSUD ou SBN entre outras definições com pouco referencial prático;

9) Acoplar ao MODCEL SHIM ao escoamento no subsolo em aquíferos livres;

10) Incorporar o cálculo de deposição de tempo seco nas células e de esquemas de varrição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. 2021 INDICADORES DE QUALIDADE - ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS (IQA). Disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx

ÁGUAS DO BRASIL. Normas e Procedimentos NP121: Diretrizes para viabilidade_Análise de projeto_Vistoria. Revisão 3, 2022.

ALBERT, C. et al. Planning nature-based solutions: Principles, steps, and insights. Ambio: A Journal of Environment and Society, v. 50, n. 8, p. 1446-1452, 2020.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS; WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION – ASCE. Gravitysanitarysewer design andconstruction. 2ª. ed. Estados Unidos da América: ASCE-WPCF, 1982. ISBN 978-0872623132.

AQUAFLUXUS CONSULTORIA AMBIENTAL EM RECURSOS HÍDRICOS.02020 Estudo hidrológico-hidrodinâmico para avaliação das cheias fluviais na bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu.

ARGUE, J. R.; PEZZANITI, D. Catchment “greening” using stormwater in Adelaide, South Australia. Water Science and Technology. pp. 177-183. 1999.

ARMAS I.; AVRAM E. Perception of flood risk in Danube Delta, Romania. Natural Hazards, 2009.

ARTINA, S. *et al*. Sistemi di fognstura: manuale di progettazione. Milano: CSDU-HOEPLI, 1997. 966 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12207: projeto de interceptores de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12208: projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de esgoto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9648: estudo e concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9649: projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986b.

AZEVEDO NETTO, J. M. Cronologia dos serviços de esgotos, com especial menção ao Brasil. Revista do Departamento de Águas e Esgotos de São Paulo, São Paulo, ano 20, n. 33, p. 15-19, 1959.

BACCHIN, Taneha K. et al. Green-blue multifunctional infrastructure: An urban landscape system design new approach. In: 13th International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia. 2014. p. 7-12.

BAHIA. Plano Estadual de Manejo de Águas Pluviais e Esgotamento Sanitário. TOMO VII –Concepção e Ações Difusas. Volume 1 –Ações para o Estado da Bahia. Governo do Estado da Bahia. Secretaria de Desenvolvimento Urbano. 2010.

BANCO MUNDIAL. Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Santa Catarina - Novembro de 2008. Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado de Santa Catarina, 2012a.

BANCO MUNDIAL. Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Alagoas - Junho de 2010. Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado de Alagoas. Novembro de 2012b.

BANCO MUNDIAL. Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Pernambuco - Junho de 2010. Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado de Pernambuco, 2012c.

BANCO MUNDIAL. Avaliação de Perdas e Danos: Inundações e Deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro - Janeiro de 2011. Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2012d.

BARNES, D. et al. Water and wastewater engineering systems. 1981.

BENEDICT, M. A. *et al*. Green infrastructure: linking landscapes and communities. Island press, 2012.

BENEDICT, M; McMAHON, E. Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century. Washington: Sprawl Watch Clearinghouse, 2002.

BENETTI, A. D.; GEHLING, G. R. Sistema Combinado de Esgotos: possibilidades e limitações em sua utilização. In: ASSEMBLÉIA DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS SERVIÇOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO, 34., 2004, Caxias do Sul. Anais... Brasília: ASSEMAE, 2004, p. 1-20.

BERNARDES, R. S.; SOARES, S. R. A. Esgotos combinados e controle da poluição: estratégias para planejamento do tratamento da mistura de esgotos sanitários e águas pluviais. 1. ed. Brasília: Caixa Econômica Federal, 2004.

BOTZEN W. J. W.; AERTS J. C. H. J.; VAN DEN BERGH J. C. J. M. Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors. Water Resources Research, 2009; 45:1–15.

BRASIL. Lei Federal nº 11.445, de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766/1979, 8.987/1990, 8.666/1993, 8.987/1993, 8.987/1995, revoga a Lei nº 6.528/1978; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 8 de janeiro de 2007.

BRASIL. Lei Federal nº 14.026, de junho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 15 de julho de 2020.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Anuário brasileiro de desastres

naturais: 2011. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Brasília, DF: CENAD, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Cartilha Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção/ Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018 56 p. : il.

BRILLY M.; POLIC M. Public perception of flood risks, flood forecasting and mitigation. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005.

CÂMARA METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO, 2017. Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PEDUI/RMRJ). Rio de Janeiro: Câmara Metropolitana de Integração Governamental (CMIG), 2017.

CANHOLI, A.P. Drenagem urbana e controle de enchentes. Oficina de Textos, São Paulo. 304 p. 2005.

CAVINATTO, Vilma Maria. Saneamento básico: fonte de saúde e bem-estar. 13. ed. São Paulo: Moderna, 1996.

CEPED/UFSC. Relatório de Danos Materiais e Prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil. 2020.

CHARLESWORTH, S. M. et al. A Review of Sustainable Drainage Systems (SuDS): A Soft Option for Hard Drainage Questions? Geography. Vol. 88, No. 2, pp. 99-107. 2003.

CHI WATER. PCSWMM. Advanced modeling software for stormwater, wastewater, watershed and water distribution systems. 2020.

CHOW, Ven Te, A note on the Manning formula, Trans, Am. Geophys. Union, 36, 688, 1959.

COELHO, F. M. Proposição de nova metodologia de cálculo e de dimensionamento para sistemas de esgotamento sanitário com a investigação dos parâmetros hidráulicos. 2020. Tese (Doutorado). Programa de Engenheria Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

COHEN-SHACHAM, E. et al. Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. Environmental Science and Pol-icy, v. 98, p. 20–29, 2019.

CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION – CIRIA. Planning policy and flood risk: The translation of national guidance into local policy. Planning, practice & research, v. 22, n. 4, p. 513-534, 2007.

COSTA, H.; TEUBER, W. Enchentes no Estado do Rio de Janeiro–uma abordagem geral. Rio de Janeiro [RJ]: SEMADS, 2001.

CRABTREE, R. et al. Mousetrap—a deterministic sewer flow quality model. Water science and Technology, v. 30, n. 1, p. 107-115, 1994.

CRED; UNDRR, "2020: The Non-COVID Year in Disasters," Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED Crunch), issue no. 62, May 2021; www.undrr.org/publication/2020-non-covid-year-disasters.

DIAS, A.P. Análise da interconexão dos sistemas de esgotos sanitário e pluvial da Cidade do Rio de Janeiro: valorização das coleções hídricas sob perspectiva sistêmica. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003.

DRAMSTAD, W. E.; OLSON, J.; & FORMAN, R. Landscape ecology principles in landscape architecture and land-Use planning. Washington, DC: Island Press, 1996.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Manual for combined drainage overflow control. In: EPA report or EPA/625/R-93/007. Environmental Protection Agency (EPA), Cincinnati. 1993

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Results of the Nationwide Urban Runoff Program. Final Report. 1983.

EOS. ORGANIZAÇÃO E SISTEMAS, Governança no Saneamento Básico: Por onde começar? Disponível em: https://www.eosconsultores.com.br/governanca-no-saneamentobasico

ESPINOSA, G.; OTTERPOHL, R. Assessing material flows in urban systems: an approach to maximize the use of incomplete data sets. Water science and technology, v. 70, n. 6, p. 1135-1142, 2014.

EVERARD, M.; MOGGRIDGE, H. L. Rediscovering the value of urban rivers. Urban Ecosystems, v. 15, n. 2, p. 293-314, 2012.

FACT SHEET: Biden-Harris Administration Announces Roadmap for Nature-Based solutions to Fight Climate Change, Strengthen Communities, and Support Local Economies. The White House, 2022. Disponível em: < https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/11/08/fact-sheet-biden-%E2%81%A0harris-administration-announces-roadmap-for-nature-based-solutions-to-fight-climate-change-strengthen-communities-and-support-local-economies/>. Acesso em: 10 de nov. de 2022.

FADEL, A. W.; DORNELLES, F. Eficiência da interceptação de esgoto sanitário em rede pluvial na bacia do arroio Capivara-Porto Alegre/RS. Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 20, n. 4 (out./dez. 2015), p. 970-979, 2015.

FARIAS, A. R., MINGOTI, R., VALLE, L. D., SPADOTTO, C. A., & LOVISI FILHO, E. Identificação, mapeamento e quantificação das áreas urbanas do Brasil. Embrapa Territorial-Comunicado Técnico (INFOTECA-E). 2017.

FIREHOCK, K. A short history of the term green infrastructure and selected literature. 2010. [Online]. Available at: http://www.gicinc.org/PDFs/GI%20History.pdf

FONSECA, P. R.; FRANÇA. O CRESCIMENTO URBANO E SUAS CONSEQUÊNCIAS NA RECONFIGURAÇÃO DO BAIRRO DE CAMPO GRANDE, RIO DE JANEIRO. RDE-Revista de Desenvolvimento Econômico, v. 13, n. 24, 2012.

FREITAS, L.F.G., *et al*. Expansão urbana e agricultura do bairro de Campo Grande\RJ. 2016. DG/IA/UFRRJ.

FUNDAÇÃO COPPETEC/UFRJ. Análise da viabilidade técnica e econômica da implantação de estruturas de captação de esgotos sanitários em tempo seco (CTS) e de tratamento de deflúvios poluídos (UTR) no âmbito da Área de Planejamento 4 da Cidade do Rio de Janeiro – Relatório Técnico. Rio de Janeiro. 115. 2018.

GEHLING, G.R.; BENETTI, A.D. Aceitabilidade de sistema combinado de esgotos em planos diretores de esgotamento sanitário. 2005. Conference Proceedings in the XVI Brazilian Symposium of Water Resources, João Pessoa, Brasil.

GOITIA, F. C. Breve história do urbanismo, Lisboa, Editorial Presença, 1989. PROJETO MEGACIDADES. Megacidades, Vulnerabilidades e Mudanças climáticas: Região Metropolitana do Rio De Janeiro. 2011.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. 2020a. Anexo 01 - minuta de contrato de concessão dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário nos municípios do bloco. Disponível http://www.concessaosaneamento.rj.gov.br/documentos/grupo2/Contrato-de-Concessao.pdf>. Acesso em: 10/10/2022.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. 2020b. Anexo IV- Caderno de encargos da concessão. Disponível em: http://www.concessaosaneamento.rj.gov.br/documentos/grupo2/ANEXO-IV-Caderno-de-Encargos.pdf>. Acesso em: 10/10/2022.

GUIMARÃES, L.F.; BATTEMARCO, B.P.; OLIVEIRA, A.K.B.; MIGUEZ, M.G. A new approach to assess cascading effects of urban floods. ENERGY REPORTS, v. 1, p. 1, 2021.

GUPTA, Kapil; SAUL, Adrian J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. Water research, v. 30, n. 5, p. 1244-1252, 1996.

HANDMER, J. W. Anuflood in New Zealand: Part2 - Background to Flood Loss Measures, Center for Resource and Enviromental Studies, Hamilton, New Zealand. 1986.

HECHTMAN, R.; LEIRAS, A. Análise comparativa de desastres no Brasil usando a metodologia DaLa (Damage & Loss assessment). Relatorio resumo 2014, PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil. 2014. Disponível em: http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2014/relatorios_pdf/ctc/IND/IND-Rebeca%20Hechtman.pdf

HERZOG, C. P.; ROSA, L. Z. Infraestrutura Verde: Sustentabilidade e resi-liência para a paisagem urbana. Revista LABVERDE, n. 1, p. 92-115, 2010.

HURFORD, A. P.; MAKSIMOVIĆ, Č.; LEITAO, J. P. Urban pluvial flooding in Jakarta: applying state-of-the-art technology in a data scarce environment. Water Science and Technology, v. 62, n. 10, p. 2246-2255, 2010.

IBGE. Censo Demográfico 2010. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE – INEA. 2019. BOLETIM CONSOLIDADO DE QUALIDADE DAS ÁGUAS. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Governo do Estado do Rio de Janeiro.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE – INEA. 2020. BOLETIM CONSOLIDADO DE QUALIDADE DAS ÁGUAS. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Governo do Estado do Rio de Janeiro.

IRM. Instituto Rio Metrópole. Strategic Plan for Integrated Urban Development for the Metropolitan Region of Rio de Janeiro. In Portuguese: Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PEDUI/RMRJ) 2017.

JEAN, M. et al. Optimization of Real-Time Control With Green and Gray Infrastructure Design for a Cost-Effective Mitigation of Combined Sewer Overflows. Water Resources Research, v. 57, n. 12, p. e2021WR030282, 2021.

JOSHI, P. et al. Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. Water Research, v. 191, p. 116780, 2021.

KIRCHESCH, V. V.; SCHÖL, A. The water quality model QSIM- A tool for simulation and prediction of water quality and plankton dynamics in rivers. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung/Hydrology and Water Resources Management-Germany, v. 43, n. 6, p. 302-308, 1999.

KOZAK, D. et al. Blue-green infrastructure (BGI) in dense urban watersheds. The case of the Medrano stream basin (MSB) in Buenos Aires. Sustainability, v. 12, n. 6, p. 2163, 2020.

LANA, L. C. O. et al. Performance of a single stage vertical flow constructed wetland system treating raw domestic sewage in Brazil. Water Science and Technology, v. 68, n. 7, p. 1599-1606, 2013.

LEVENSPIEL, O. Engenharia das reações químicas. Editora Blucher, 2000.

LIAO, K; DENG, S; TAN, P. Blue-Green Infrastructure: New Frontier for Sustainable Urban Stormwater Management, 2017. 10.1007/978-981-10-4113-6_10.

LIMA, N. T. O Brasil e a organização Pan-Americana da saúde: uma história de três dimensões. In: FINKELMAN, Jacobo. (Org.). Caminhos da saúde pública no Brasil. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 2002. Disponível em: https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/icict/2705/1/Finkelman_Jacobo(Org.).pdf.

MADEIRA, D. G. Implantação de sistema de esgoto do tipo unitário com posterior adequação ao sistema separador absoluto em Flores da Cunha-RS. 2012.

MELBOURNE WATER2005. WSUD Engineering Procedures: Stormwater. Melbourne: CSIRO Publishing. 2005.

METCALF, L.; EDDY, H.P.; TCHOBANOGLOUS, G. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. New York: McGraw-Hill, 1991.

MIGUEZ, M. G. Modelo Matematico de células de escoamento para bacia urbana. 2001. Tese (Doutorado). Programa de Engenheria Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, v. 44, n. 5, p. 925-946, 2017.

MIGUEZ, M.G.; VERÓL, A.P.; REZENDE, O.M. Drenagem Urbana: do projeto original à sustentabilidade. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MONTSERRAT, A. et al. Using data from monitoring combined sewer overflows to assess, improve, and maintain combined sewer systems. Science of the Total Environment, v. 505, p. 1053-1061, 2014.

MORGAN, C.; BEVINGTON, C.; LEVIN, D.; ROBINSON, P.; DAVIS, P.; ABBOTT, J. & SIMKINS, P. “Water Sensitive Urban Design in the UK – Ideas for built environment practitioners”. Londres: CIRIA, 2013.

MORVANNOU, A., FORQUET, N., MICHEL, S., TROESCH, S., MOLLE, P. (2015). Treatment performances of French constructed wetlands: results from a database collected over the last 30 years. Water Science and Technology, 71(9), 1333–1339.

NASCIMENTO, V. F. S.; ARAÚJO, M. F.F. Ocorrência de bactérias patogênicas oportunistas em um reservatório do semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil. Revista de Ciências Ambientais, v. 7, n. 1, p. 91-104, 2013.

NATURE-BASED SOLUTIONS. European Commission, 2022. Disponível em: <https://rea.ec.europa.eu/funding-and-grants/horizon-europe-cluster-6-food-bioeconomy-natural-resources-agriculture-and-environment/nature-based-solutions_en>. Acesso em: 25 de nov. 2022.

NCUBE, S.; ARTHUR, S. Influence of blue-green and grey infrastructure combinations on natural and human-derived capital in urban drainage planning. Sustainability (Switzerland), [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1–18, 2021.

NETTO, A.; Y FERNÁNDEZ, M. F. Manual de hidráulica. Editora Blucher, 2018.

NIEZGODA, S. L.; JOHNSON, P. A. Improving the urban stream restoration effort: identifying critical form and processes relationships. Environmental management, v. 35, n. 5, p. 579-592, 2005.

OLIVEIRA, A. K. B. *et al*. An alternative flood model calibration strategy for urban watersheds: the case study of Riohacha, Colombia. Water Science and Technology, v. 79, n. 11, p. 2095-2105, 2019.

OLIVEIRA, A. K. B. et al. Avaliação do Uso de Reservatórios Individuais de Detenção de Águas Pluviais para Controle de Inundações Urbanas, Com Auxílio do Modelo de Células de Escoamento – MODCEL. Congresso ABES FENASAN 2017. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.

OLIVEIRA, A. K. B. O Sistema de Drenagem como Eixo Estruturante do Planejamento Urbano: Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Acari. 2018. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OPPERMANN R, SCHUMACHER F, KIRCHESCH V. Hydrax—Ein hydrodynamisches 1-D Modell. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz. 2015. https://doi.org/10.5675/HYDRAX

ORSINI, L. F. Sistemas Integrados de Águas Pluviais e Esgotos Sanitários. In: WORKSHOP DE SISTEMAS INTEGRADOS DE ÁGUAS PLUVIAIS E ESGOTOS SANITÁRIOS, 1., 2011, Curitiba. Anais... Curitiba: FCTH, 2011, p. 1-8.

PECK, S. Planning for biodiversity: issues and examples. Island Press, 1998.

PEREIRA, L. F. M.; FERREIRA, J. S. M; SANTOS, F. Inserção do sistema de drenagem na concepção dos projetos de esgotamento sanitário–sua pertinência, viabilidade e admissibilidade. 2020.

PEREIRA, LFM. Controle Social das Águas: O poder local como base do desenvolvimento. Um Estudo de Caso: A Região dos Lagos, RJ. Rio de Janeiro: Garamond, 2014.

PERINI, K.; SABBION, P. Urban sustainability and river restoration: green and blue infrastructure. John Wiley & Sons, 2016.

POLETO, C e TASSI, R. Sustainable Urban Drainage Systems. Drainage Systems. Prof. Muhammad Salik Javaid (Ed.), Intech. 2012.

PONCE V. M.; SIMONS D. B., 1977, Shallow water propagation in open channel fllow, J. Hydraul. Div., ASCE, HY12, 1461 – 1476.

PÖTZ, H.; BLEUZÉ, P. Green-Blue grids, manual for resilient cities. H. Pötz, Green-blue grids; Manual for resilient cities, p. 65-233, 2016.

PPGEA/UFSC. Wetlands construídos como ecotecnologia para o W539 tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras [recurso eletrônico] / organização de Pablo Heleno Sezerino, Catiane Pelissari – 1.ed. - Curitiba: Brazil Publishing, 2021. Disponível

em: https://gesad.ufsc.br/files/2021/02/E-book-WETLANDS-BRASIL-Experi%C3%AAncias-Brasileiras-1.pdf

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. Plano Diretor de Manejo de águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro (PDMAP) – Bacia Hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu: proposição, análise e avaliação de intervenções de manejo de águas pluviais em sub-bacia hidrográfica. Rio de Janeiro, 2012.

RADESCA, F. D. Uso de Sistemas Unitários de Esgoto e Drenagem como estratégia alternativa e escalonada no tempo para o Saneamento Ambiental. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil- COPPE – Rio de Janeiro: UFRJ, 2018.

RAMOS, W. B. Dimensionamento De Sistema De Microdrenagem Na Bacia Do Rio Piraquê-Cabuçu E Avaliação Da Sua Performance, Adotando ma Abordagem De Infraestrutura Verde E Azul, Com Apoio De Modelagem Hidrodinâmica. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2022.

REZENDE, O. M. Análise Quantitativa da Resiliência a Inundações para o Planejamento Urbano: Caso da Bacia do Canal do Mangue no Rio de Janeiro. Tese de doutorado. UFRJ/COPPE, 2018.

REZENDE, S. C e HELLER, L. O saneamento no Brasil: Políticas e interfaces. Belo Horizonte: UFMG, 2002.

RIBEIRO, G. Acerca do cálculo da vazão de obras d'arte: tempo de concentração, Revista do Clube de Engenharia, n. 294, p. 16-19, 1961.

RIECHEL, M. *et al*. Impacts of combined sewer overflows on a large urban river–Understanding the effect of different management strategies. Water research, v. 105, p. 264-273, 2016.

RIO-ÁGUAS. Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana. 2019. Disponível em:< chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8940582/4244719/InstrucaoTecnicaREVISAO1.pdf>. Acesso em: 14/10/2021.

RODRIGUES, Eduardo Bello et al. Utilização do biocarvão como meio filtrante de wetland construído vertical empregado no tratamento de esgoto sanitário. 2021.

ROSENZWEIG, C.; AL, E. Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network. Urban Climate Change Research Network. New York: Cambridge University Press. 2018. 811p.

ROSMAN, P. C. C. Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental – Capítulo 1 (pp 1-161) do livro Métodos Numéricos em Recursos Hídricos, Vol. 5. Editora ABRH e Fundação COPPETEC. 2001.

SABESP. Relatório de sustentabilidade. 2016. Disponível em: Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/sociedade_meioamb/relatorio_sustentabilidade_2016.pdf>. Acesso em: 14/10/2021.

SÃO BERNARDO DO CAMPO, Defesa Civil. Enchente, Inundação, Alagamento ou Enxurrada? Disponível em: SÃO BERNARDO DO CAMPO, Defesa Civil. Enchente, Inundação, Alagamento ou Enxurrada? 2011. Disponível em: http://dcsbcsp.blogspot.com.br/2011/06/enchente-inundacao-ou-alagamento.html> Acesso em:.08/01/2018

SCARANO, F. R. Ecosystem-based adaptation to climate change: concept, scalability and a role for conservation science. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 15, n. 2, p. 65-73, 2017.

SEMADS. Enchentes no Estado do Rio de Janeiro–uma abordagem geral. Rio de Janeiro [RJ]. 2001.

SHINOHARA, Patrícia Yoshie. Implantação de um sistema francês de wetland construído como proposta para tratamento da água residuária do restaurante universitário. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILVA, E. R. Os cursos da água na história: simbologia, moralidade e a gestão de recursos hídricos. Tese (Doutorado) - Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 1998.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico dos Serviços de Esgotos. SNIS, 2018. Disponível em: Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2016 >. Acesso em: 14/10/2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico dos Serviços de Esgotos. SNIS, 2020. Disponível em: Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2016 >. Acesso em: 14/10/2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico dos Serviços de Esgotos. SNIS, 2021. Disponível em: Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/agua-e-esgotos>. Acesso em: 14/10/2021.

SOUSA, M.M. Avaliação Comparativa De Metodologias De Modelagem Hidráulica 2d E Seu Impacto Na Interpretação E Avaliação De Ondas De Cheia. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 2017.

SOUZA, F. S. O saneamento básico na história da humanidade. 2009.

SOUZA, G. H. F. Projeto de um sistema wetland francês para tratamento de efluente em um campus universitário. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

STREETER, Harold Warner. Some Preliminary Observations from a Study of Water Filtration Plants Along the Ohio River. Public Health Reports (1896-1970), p. 202-213, 1925.

SZTRUHÁR, Daniel et al. Comprehensive assessment of combined sewer overflows in Slovakia. Urban Water, v. 4, n. 3, p. 237-243, 2002.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H. D. Wastewater engineering. Management, v. 7, n. 1, p. 4, 1991.

TEJASWINI, V.; SATHIAN, K. K. Calibration and Validation of Swat Model for Kunthipuzha Basin Using SUFI-2 Algorithm. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci, 7(1), 2162-2172. 2018.

TODESCHINI, Sara; PAPIRI, Sergio; CIAPONI, Carlo. Performance of stormwater detention tanks for urban drainage systems in northern Italy. Journal of environmental management, v. 101, p. 33-45, 2012.

TOMAZ, Plínio. Rede de esgoto. São Paulo: Navegar Ed, 2011.

TSUTIYA, M. T.; ALEM SOBRINHO, P. Coleta e transporte de esgoto sanitário. 2. ed. São Paulo: Winner Graph, 2000. 548 p. ISBN 85-90082-31-8.

TSUTIYA, M.T.; BUENO, R.C.R. Contribuição de Águas Pluviais em Sistemas de Esgoto Sanitário no Estado de São Paulo. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária eAmbiental. ABES, anais, Campo Grande, 2005.

VALENTE, O. F. Reflexões hidrológicas sobre inundações e alagamentos urbanos. Minha Cidade, São Paulo, ano 10, n. 109.01, Vitruvius, ago. 2009 Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/minhacidade/10.109/1839> Acessado em 08/01/2022.

VON SPERING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (SESA/ UFMG, 2005.

VON SPERING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. 4 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (SESA/ UFMG, 2014. 472 p.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Editora UFMG, 1996.

VOSKAMP, I. M.; VAN DE VEN, F. H. M. Planning support system for climate adaptation: Composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events. Building and Environment, v. 83, p. 159-167, 2015.

WALLINGFORD SOFTWARE – WSL. 2004. InfoWorks CS User Manual. Copyright 1997. Wallingford Software Ltd. 1997.

WEIBEL, S. R.; ANDERSON, R. J.; WOODWARD, R. L. Urban land runoff as a factor in stream pollution. Journal (Water Pollution Control Federation), p. 914-924, 1964. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/25035106

WITTLER, H. Esgoto pluvial sem cheiro: caixa ecológica. Viamão, 2012. Disponível em: <http://www.hploco.com/letra_w/wittler/>.

WOODS, B. B. et al. The SUDS Manual (C697). Construction Industry Research and Information Association, London. 697 p. 2007.

WORLD BANK. Damage and Loss Assessment (DaLA) Methodology. 2013. Disponível em: http://go.worldbank.org/KWCRRCKA20. Acesso em 08/01/2018.

YAZAKI, L. F. O. et al. Uso potencial de sistemas mistos de esgotos e águas pluviais para redução da poluição hídrica em bacias urbanas. 17th Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, São Paulo, p. 25-29, 2007.

ZANOBETTI, D. LORGERÉ, H.; PREISSAMAN, A., CUNGE, J. Mekong delta mathematical construction, Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE, v. 96, n.WW2, p. 181-199, 1970.

ZONA OESTE MAIS. ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO. 2022. Disponível em: <https://www.zonaoestemais.com.br/estacoes-de-tratamento-de-esgoto>. Acesso em: 25 de out. de 2022.