



Lucas Andrade Pires

Igor Salles de Oliva

**Projeto conceitual para mitigação de inundações na
bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigues de Freitas, com
foco no bairro do Jardim Botânico**

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de
Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro, Brasil

Orientador: Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Rio de Janeiro
Julho de 2023



Agradecimentos – Lucas Andrade Pires

O presente trabalho é o marco final da minha passagem de graduação pela PUC-Rio, onde conheci pessoas maravilhosas, aprendi com os melhores professores de engenharia do país e pude aprender não só conhecimentos de engenharia, mas de vida. Desde o primeiro dia que pisei naquele lugar, um prédio imponente e intimidador, não imaginava que o meu mundo acabara de ficar imensamente maior, que meus horizontes seriam expandidos de uma maneira brutal, mas ao mesmo tempo acolhedora. Por isso, agradeço à PUC que, com toda sua história e excelência, me tornou, além de um engenheiro, um ser humano melhor.

Em relação a todas as pessoas que fizeram parte dessa conquista, não poderia começar de maneira diferente senão agradecendo aos meus pais, Flavio e Elisete, que são os pilares da minha vida desde o momento do meu nascimento, que acreditaram em mim quando nem mesmo eu pude acreditar, sem duvidar nem por um momento de que eu era capaz de fazer tudo aquilo para o que eu me propusesse a fazer. Apesar das adversidades que meus pais enfrentaram, com meu pai sendo órfão aos 13 anos e minha mãe que residia em uma moradia modesta, que dificilmente comportava seus irmãos, hoje eles podem se encher de emoção e orgulho ao afirmarem que me criaram e me formaram na melhor universidade do país. É uma conquista que transcende o material, pois representa a superação de obstáculos, a força de vontade e o amor incondicional que eles dedicaram para me proporcionar oportunidades melhores. Serei eternamente grato por seu apoio incansável e por tornarem possível o meu sonho de obter uma educação de excelência. Sempre acreditei que nós somos formados pelo produto das pessoas que nos cercam e, por isso, tenho absoluta certeza de que a maior parte do que sou representa, em verdade, eles. Nenhum agradecimento nunca será suficiente para todo amor e carinho incondicional que recebi por toda minha vida, vocês são os amores da minha vida para todo o sempre. Sem vocês nada disso teria sido possível.



Agradeço, também, à minha irmã, Laura, que sempre me apoiou na vida, e na faculdade, estando sempre presente quando eu precisei, sempre pronta para fazer todo o possível para ajudar. Te amo, minha irmã. Tenho muito orgulho de você.

É difícil expressar em palavras a gratidão que sinto pelo amor que a vida me presenteou em forma de Ana Caroline. Ela tem sido uma presença inestimável em minha vida e desempenhou um papel fundamental para que eu alcançasse este momento tão especial. Ana Caroline é uma pessoa extraordinária, cheia de luz e generosidade, sempre pronta a estender sua mão e oferecer ajuda incondicionalmente. O seu amor e apoio são a base que sustenta meus passos, e não tenho como descrever o quanto isso significa para mim. Te amo além das palavras.

Agradeço aos meus tios Evelin e Anderson, que demonstraram e demonstram até hoje a forma mais genuína de amor, me amando apenas por eu ser quem sou, eu amo muito vocês. Apesar do meu avô Isaac e minha avó Maria não estar mais entre nós, fisicamente, para celebrar comigo, sei que onde quer que eles estejam, estarão felizes e orgulhosos por essa conquista.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Antonio Krishnamurti, que também foi meu professor de hidrologia e compartilhou conhecimentos engenharia e de vida imensuráveis, sendo considerado por mim (e tenho certeza de que por todos que o conhecem) uma pessoa extraordinária, muito bondoso e solícito, sempre disposto a fazer o seu melhor para ajudar a todos. Está aqui meu trabalho de 180 páginas pois não tive tempo de fazer um de 50.

Gostaria de expressar minha gratidão especial ao meu grande amigo, que considero como um irmão, e parceiro neste relatório, Igor Salles. Desde o primeiro período, formamos uma dupla em diversos trabalhos ao longo dessa trajetória. Nossa jornada na faculdade foi vivida intensamente, repleta de momentos inesquecíveis que serão transmitidos às próximas gerações. Somos



testemunhas vivas de que qualquer pessoa tem o potencial de evoluir. Chegamos ao ponto de realizar um trabalho como este, e é motivo de orgulho tanto para mim quanto para você. Juntos, superamos desafios e alcançamos novos patamares, e essa conquista é verdadeiramente especial.

Não poderia esquecer dos meus amigos da faculdade, especialmente os que estiveram comigo desde o começo, Alexandre Costa, Ana Carolina Oliveira, Augustus, Nicholas, Dudu Câmara, Matheus Takita, Lucas Lucho, que são aqueles amigos em que estarão sempre presentes, de alguma forma, na minha vida. Vocês sempre estiveram comigo quando precisei e eu sempre vou estar lá para vocês quando precisarem de mim. Sem vocês não seria possível levar essa graduação de forma leve, engraçada e prazerosa.

Há que se mencionar, ainda, meus queridos amigos Marcos Paulo, William Almeida, Leonardo Gois, Michel Romão, amigos que estão comigo desde a infância, e sempre me apoiaram nesta jornada.

Por fim, deixo meu agradecimento para todos aqueles que participaram de alguma forma da minha graduação e não foram aqui citados especificamente, vocês também fazem parte dessa conquista.



Agradecimentos – Igor Salles de Oliva

Gostaria de começar expressando minha profunda gratidão a Deus por abençoar-me com saúde e força para enfrentar mais uma etapa significativa da minha vida.

Aos meus amados pais, Olney Moraes de Oliva e Márcia Helena Salles de Oliva, sou imensamente grato por todo o apoio e suporte que me proporcionaram não apenas neste trabalho de conclusão de curso, mas durante toda a minha existência. Tenho plena convicção de que, sem o amparo e encorajamento incansáveis deles, nada do que estou vivenciando seria possível. Além disso, não posso deixar de reconhecer o papel fundamental do meu irmão, Iago Salles de Oliva, que, ao longo dos anos, contribuiu significativamente para o meu crescimento pessoal, ajudando-me a me tornar uma pessoa melhor e mais paciente, te amo muito.

Uma pessoa que não posso deixar de mencionar é a minha namorada, Amanda Santos Loredó. Seu apoio e amor incondicional nos momentos mais desafiadores da faculdade foi fundamental para que eu não desistisse e seguisse em frente. Sou grato por sua presença constante ao meu lado, incentivando-me e acreditando no meu potencial, meu amor por você é incomensurável.

Não posso esquecer-me dos meus avós maternos, Rosevalter Gonçalves Salles e Maria De Lourdes dos Santos Salles, que desempenharam um papel crucial não apenas durante o período da faculdade, mas em toda a minha vida, contribuindo para a minha formação acadêmica e social. Gostaria de fazer uma menção especial ao meu avô materno, um exímio Major do exército brasileiro, cuja inteligência e sabedoria foram essenciais para me ajudar a compreender e estudar História e Geografia com suas aulas particulares durante a minha infância.

Também gostaria de expressar minha gratidão aos meus avós paternos, Odyr Jacarandá de Oliva (*in memoriam*) e Lygia Maria Moraes de Oliva (*in memoriam*),



cuja presença em minha vida ao longo de 20 anos foi fundamental para moldar a pessoa e o estudante que sou hoje. Em especial, minha avó paterna, uma dedicada professora, teve um papel crucial para que tudo isso pudesse se tornar possível, se hoje estou alçando voos altos, quem me ensinou a voar foi ela.

Aos meus primos, Luís Fernando Florêncio Torres dos Santos, Leonardo Tadeu Terêncio da Silva (*in memoriam*) e Mayara Mendonça Dias Siston, sou profundamente grato por toda a união, apoio e sabedoria que compartilhamos ao longo da minha trajetória. Juntos, superamos desafios e crescemos como seres humanos.

À minha dupla de trabalho, Lucas Andrade Pires, gostaria de expressar minha sincera gratidão. Durante seis meses, trabalhamos em estreita colaboração para realizar este projeto com dedicação e cuidado excepcionais. Sua participação foi indispensável e contribuiu significativamente para a qualidade e o sucesso alcançados.

Por último, mas certamente não menos importante, gostaria de agradecer ao meu orientador, Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira. Suas correções, ensinamentos e orientações foram inestimáveis, permitindo apresentar um desempenho e uma qualidade melhores ao longo de todo o processo de formação deste trabalho e acadêmica. Peço sinceras desculpas pelo inconveniente, ciente de que o pedido inicial era um trabalho de 100 páginas. Infelizmente, devido a restrições de tempo, não fui capaz de atender plenamente essa exigência. No entanto, trabalhamos arduamente e conseguimos entregar um projeto de 180 páginas.



Resumo

No dia 9 de abril de 2019, uma chuva intensa atingiu a cidade do Rio de Janeiro gerando uma série de consequências negativas à capital. Diversas regiões sofreram com o acúmulo de água devido ao extravasamento dos rios e/ou canais, provocando muitas perdas para moradores, comerciantes e para a infraestrutura do município. O bairro do Jardim Botânico foi uma das regiões mais atingidas por essas inundações, justificadas pelo elevado índice pluviométrico da região e pelas características topográficas da sua bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas que engloba o Jardim Botânico se caracteriza por a montante possuir encostas com alta declividade, que geram respostas rápidas de escoamento superficial e picos de vazão significativos, e a jusante possuir uma região plana, com dificuldades de escoamento, causadas em sua maioria pela falta de declividade e intervenções antrópicas nos cursos d'água, que, somadas ao remanso da Lagoa, geram um cenário crítico para o sistema de drenagem. Logo, visto a necessidade de encontrar soluções para este complexo sistema, o presente projeto tem como objetivo principal realizar um projeto conceitual de mitigação de inundações apresentando diversos cenários de alternativas estruturais que mitiguem as falhas do sistema de drenagem nas áreas críticas da região de estudo, principalmente em sua área mais crítica, o Jardim Botânico. Para quantificar a mitigação das inundações do projeto, será utilizado o MODCEL, um Modelo Hidrológico-Hidrodinâmico *Quasi-2D*. Como principal resultado do trabalho, foi possível conceber um cenário de projeto que logra reduzir em 77% as lâminas de inundações na região mais crítica da área de estudo, porém, vale destacar que apesar dos esforços, ainda são observadas inundações para o tempo de recorrência de 25 anos, referência para projetos de macrodrenagem, devido à geografia local, ao elevado grau de ocupação urbana e alteração dos cursos d'água naturais.

Palavras-chave: Macrodrenagem urbana; Inundações; MODCEL; Jardim Botânico; Bacia Hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas.



Abstract

On April 9, 2019, a heavy rainfall hit the city of Rio de Janeiro, resulting in a series of negative consequences for the capital. Several regions experienced water accumulation due to rivers and/or canals overflowing, causing significant losses for residents, businesses, and the city's infrastructure. The Jardim Botânico neighborhood was one of the most affected areas by these floods, justified by the high rainfall index in the region and the topographical characteristics of its watershed. The watershed of Lagoa Rodrigo de Freitas, which encompasses Jardim Botânico, is characterized by steep slopes upstream, leading to rapid surface runoff and significant peak flows, and a flat downstream region with poor drainage, mainly due to lack of slope and human interventions in watercourses. Combined with the backwater effect of the Lagoa, this creates a critical scenario for the drainage system. Therefore, considering the need to find solutions for this complex system, the present project aims to develop a conceptual flood mitigation plan by presenting various scenarios of structural alternatives that address the shortcomings of the drainage system in critical areas of the study region, especially in the most critical area, Jardim Botânico. To quantify the flood mitigation of the project, the MODCEL, a Quasi-2D Hydrological-Hydraulic Model, will be utilized. The main outcome of the work was the development of a project scenario that achieves a 77% reduction in flood depths in the most critical region of the study area. However, it is worth noting that despite the efforts, flooding is still observed for the 25-year return period, which is the reference for macrodrainage projects, due to the local geography, high degree of urbanization, and alterations to natural watercourses.

Keywords: Urban drainage; Flood; MODCEL; Jardim Botânico; Rodrigo de Freitas Lagoon Watershed.



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivo	4
1.2.1	Objetivo geral.....	4
1.2.2	Objetivos específicos.....	4
1.3	Escopo do trabalho	5
2	REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1	Água e Cidades.....	6
2.2	Manejo de águas pluviais e sistema de drenagem urbana.....	12
2.2.1	Chuva de Projeto.....	14
2.2.2	Falhas no sistema de drenagem.....	17
2.3	Diferentes abordagens na drenagem urbana.....	18
2.4	Sistema de drenagem do Município do Rio de Janeiro	28
3	ESTUDO DE CASO	31
3.1	Caracterização da área de estudo	31
3.1.1	Localização.....	31
3.1.2	Geologia e geomorfologia	35
3.1.3	Clima.....	37
3.1.4	Uso e ocupação do solo	38
3.2	Histórico de ocupação	41
3.3	Eventos pluviométricos extremos	47
3.3.1	Evento de 5 de abril de 2010	50
3.3.2	Evento de 20 de junho de 2017	51



3.3.3	Evento de 9 de abril de 2019	52
3.3.4	Evento de 1 de abril de 2022	54
3.3.5	Evento de 7 de fevereiro de 2023	55
3.4	Sistema de drenagem da Bacia hidrográfica do Rio dos Macacos	56
4	METODOLOGIA.....	63
4.1.	Estudos de Chuvas Intensas	63
4.2.	Construção do Modelo hidrodinâmico de cheias urbanas	66
4.2.1.	Sistema de Informação Geográfica	67
4.2.2.	Simulação Hidrológica-Hidrodinâmica de Cheias Urbanas	68
4.3.	Antecedentes da Base de Simulação.....	69
4.4.	Complementação e Calibração da Base de Simulação.....	79
4.4.1.	Complementação do cadastro do sistema de macrodrenagem	79
4.4.2.	Visita de campo para verificação dos registros de inundação.....	81
4.4.3.	Complementação de células e de ligações	83
4.4.4.	Ajuste de coeficientes hidráulicos.....	84
4.4.5.	Ajuste de cotas das células de escoamento	85
4.4.6.	Incorporação de novos registros para calibração	85
4.4.7.	Resultados do processo de calibração.....	91
4.5.	Diagnóstico das Cheias Urbanas	93
4.6.	Simulação de alternativas.....	97
4.6.1.	Cenário 1 de Alternativas de Controle de Inundações – Obras Corretivas da Lagoa Rodrigo de Freitas	97
4.6.2.	Cenário 2 de Alternativas de Controle de Inundações - Reservatório Jardim Botânico	104
4.6.3.	Cenário 3 de Alternativas de Controle de Inundações – Reservatórios de encosta	105



4.6.4.	Cenário 4 de Alternativas de Controle de Inundações Completo	110
4.6.5.	Resumo de cenários analisados.....	111
5	RESULTADOS.....	113
5.1	Cenário 0 – Situação Atual TR 25	113
5.2	Cenário 1 – Obras corretivas da Lagoa Rodrigo de Freitas	119
5.3	Cenário 2 – Reservatório Jardim Botânico.....	124
5.4	Cenário 3 – Reservatórios de Encosta.....	129
5.5	Cenário 4 – Combinação dos cenários	139
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	150
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Alterações do ciclo hidrológico de uma área rural para urbana Fonte: Schueler apud Paraná (2002).	7
Figura 2 – Alterações do escoamento superficial de uma área rural para urbana Fonte: Schueler apud Paraná (2002).	9
Figura 3 – Alterações da área inundada de uma área rural para urbana Fonte: Schueler apud Paraná (2002).	10
Figura 4 – Ciclo de degradação ocasionado pelo inadequado processo de urbanização sem contar o sistema de manejo de águas pluviais Fonte: Oliveira (2018)	11
Figura 5 – Comparativo entre o número total de desastres por tipo nos períodos de 1980 a 1999 e de 2000 a 2019 Fonte: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (2020, p.7)	12
Figura 6- Técnica de controle de inundações Fonte: Rezende, 2018	23
Figura 7 – Amortecimento em reservatórios urbanos. Fonte: Paraná (2002)	25
Figura 8 - Reservatório de retenção do Rio Dona Eugênia Fonte: Projeto Iguaçu, 2009	28
Figura 9 - Mapa das regiões administrativas da cidade do Rio de Janeiro. Fonte: Estado do Rio de Janeiro	32
Figura 10 - Mapa dos bairros da cidade do Rio de Janeiro. Fonte: Estado do Rio de Janeiro	33
Figura 11 – Divisão das bacias hidrográficas do subcomitê do sistema lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas Fonte: Comitê da Bacia da Baía de Guanabara (2021).....	34
Figura 12 - Localização da Bacia do Rio dos Macacos sobre foto aérea. Fonte: Plano Diretor de desenvolvimento Sustentável da Cidade do Rio de Janeiro – PDMAP, 2013	35



Figura 13 - Compartimentação tectônica para Província Mantiqueira (Setentrional, Central e Meridional) no contexto das faixas orogênicas neoproterozoicas, com destaque para a Faixa Ribeira que ocupa o segmento central desta província Fonte: Extraído do relatório Geologia e recurso minerais do estado do Rio de Janeiro. Legenda original. Modificada de Heilbron et al. (2004)	36
Figura 14 – Geomorfologia na região de abrangência do Subcomitê do Sistema Lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas. Fonte: Comitê da Bacia da Baía de Guanabara (2021).....	37
Figura 15 - Dados climatológicos do Rio de Janeiro Fonte: ClimateData, 2010	38
Figura 16 - Uso e cobertura do solo no estado do Rio de Janeiro Fonte: INEA, 2010	39
Figura 17 – Uso e cobertura do solo no Sistema Lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas Fonte: Subcomitê do Sistema Lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas, 2022	41
Figura 18 – Porcentagem da população que vive em área urbana por região Fonte: IBGE, Pesquisa nacional por amostra de Domicílios (PNAD), 2015	43
Figura 19 - Lagoa Rodrigo de Freitas, 1822 (Henry Chamberlain) Fonte: Enciclopédia Itaú Cultural	44
Figura 20 - Inauguração Jockey Clube Brasileiro em 1926	45
Figura 21 - Favela da Catacumba.....	46
Figura 22 – Favelização no Brasil.....	47
Figura 23 - Capas dos Jornais: (A) “Última Hora” do dia 12/01/1966, (B) “Jornal do Brasil” do dia 22/02/1988 e (C) “O Globo” de 14/02/1996.....	49
Figura 24 - Localização das ruas Jardim Botânico, Lopes Quintas e Pacheco Leão Fonte: TAKITA e CÂMARA, 2022, p. 37	50
Figura 25 - Rua Pacheco Leão (05/04/2010)	51
Figura 26 - Margem da Lagoa Rodrigo de Freitas (05/04/2010).....	51



Figura 27 - Margem da Lagoa Rodrigo de Freitas (05/04/2010).....	52
Figura 28 - Rua Jardim Botânico (09/04/2019).....	53
Figura 29 - Rua Pacheco Leão (09/04/2019)	54
Figura 30 - Rua General Garzón (01/04/2022).....	54
Figura 31 - Rua Jardim Botânico (07/02/2023).....	55
Figura 32 - Canal do Rio dos Macacos no trecho do cruzamento entre a Rua Jardim Botânico e Rua General Garzon	56
Figura 33 - Hidrografia da região estudada	58
Figura 34 – Foto da comporta da Rua General Garzón tirada no dia 02/06/2023	59
Figura 35 - Detalhe da foz do Rio dos Macacos, na Lagoa Rodrigo de Freitas.	60
Figura 36 - Matéria sobre Rua Jardim Botânico após obras de restauração da galeria.	62
Figura 37 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 25 anos no Bairro Jardim Botânico.....	64
Figura 38 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 25 anos no Bairro Rocinha. ...	65
Figura 39 - Hietograma do evento de 2019	66
Figura 40 – Divisão original da bacia do Rio dos Macacos em células.	70
Figura 41 – Divisão de células de escoamento.....	71
Figura 42 - Escala de cor do Raster. Fonte: Adaptado de Takita e Câmara (2023)	73
Figura 43 – Exemplo do perfil de um dos canais da região. Fonte: Fundação Rio-Águas.....	79
Figura 44 – Comporta do canal do Rio dos Macacos localizado na Rua General Garzón Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro.	80



Figura 45 - Visita Rua Jardim Botânico Altura do Parque Lage.....	81
Figura 46 - Visita Rua Jardim Botânico no cruzamento da Rua Pacheco Leão.....	82
Figura 47 – Visita hospital Miguel Couto.	82
Figura 48 - Células localizadas na região da Gávea (PUC-Rio).....	83
Figura 49 - Pontos de calibração da Bacia de estudo. Fonte: Autores	90
Figura 50 - Comparação entre lâmina registrada x simulada para o evento de 2019..	92
Figura 51 - Medição do desnível de 25 cm entre a rua e a calçada em frente ao Hospital Miguel Couto.	95
Figura 52 - Medição do desnível de 20 cm entre a rua e a calçada na PUC-Rio. Fonte: Autores.....	96
Figura 53 - Encontro do Rio dos Macacos com Lagoa Rodrigo de Freitas com a Comporta fechada. Foto tirada 02/06/2023.	98
Figura 54 - Localização comporta na Rua General Garzón que separa o Rio dos Macacos e a Lagoa Rodrigo de Freitas	99
Figura 55 - Região onde ocorrerá a ampliação da galeria	100
Figura 56 – Posição para a comporta que separa as bacias do Rio Rainha e do Rio dos Macacos.....	101
Figura 57 - Canal do Jóquei no trecho de encontro com o Rio dos Macacos	102
Figura 58 - Canal do Jóquei no trecho de encontro com o Rio dos Macacos	102
Figura 59 - Indicação do trecho da nova galeria na Rua Mário Ribeiro.....	103
Figura 60 - Indicação das áreas de armazenagem temporárias no Jardim Botânico	105
Figura 61 - Indicação das áreas de armazenagem temporárias (Reservatório de encosta) na Bacia do Rio dos Macacos com as curvas de nível.	106



Figura 62 - Indicação reservatórios 1 e 2	108
Figura 63 - Indicação reservatórios 3, 4 e 5.	108
Figura 64 - Indicação reservatórios 6 e 7.	109
Figura 65 - Indicação reservatórios 8 e 9.	110
Figura 66 - Mancha de inundação do Cenário 0.	114
Figura 67 - Lâmina d'água do Cenário 0 nas regiões mais críticas.	115
Figura 68 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para o Cenário 0.	116
Figura 69 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para o Cenário 0.	117
Figura 70 - Rio dos Macacos no trecho antes de entrar na galeria da Rua Jardim Botânico. Fonte: Autores.....	118
Figura 71 - Mancha de inundação do Cenário 1.	120
Figura 72 - Lâmina d'água simulada no Cenário 1.....	121
Figura 73 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para o Cenário 0 e Cenário 1.....	122
Figura 74 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para o Cenário 0 e Cenário 1.	123
Figura 75 - Mancha de inundação do Cenário 2.	125
Figura 76 - Lâmina d'água simulada no Cenário 2.....	126
Figura 77 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para o Cenário 0 e Cenário 2.....	127
Figura 78 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para o Cenário 0 e Cenário 2.	128



Figura 79 - Comparação de lâmina d'água para galerias diferentes no Cenário 2. ...	129
Figura 80 - Mancha de inundação do Cenário 3.	130
Figura 81 - Lâmina d'água simulada no Cenário 3.	131
Figura 82 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para o Cenário 0 e Cenário 3.	132
Figura 83 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para o Cenário 0 e Cenário 3.	133
Figura 84 - Amortecimento do Reservatório 1.	134
Figura 85 - Amortecimento do Reservatório 2.	135
Figura 86 - Amortecimento do Reservatório 3.	135
Figura 87 - Amortecimento do Reservatório 4.	136
Figura 88 - Amortecimento do Reservatório 5.	136
Figura 89 - Amortecimento do Reservatório 6.	137
Figura 90 - Amortecimento do Reservatório 7.	137
Figura 91 - Amortecimento do Reservatório 8.	138
Figura 92 - Amortecimento do Reservatório 9.	138
Figura 93 - Mancha de inundação do Cenário 4.	140
Figura 94 - Lâmina d'água simulada no cenário 4 com e sem microdrenagem.	142
Figura 95 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para todos os cenários. ...	144
Figura 96 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para todos os cenários.	145
Figura 97 - Comparação de lâmina d'água para galerias diferentes no Cenário 4. ...	147



Figura 98 - Pontos referentes aos locais mais críticos (Tabela 17)..... 149



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de recorrência para chuvas de projeto em sistemas de drenagem	16
Tabela 2 - Fase histórica da drenagem urbana.....	21
Tabela 3 – Comparação entre obras de canalização e de armazenamento.	27
Tabela 4 – Monitoramento de cobertura vegetal e uso de terra do Estado do Rio de Janeiro – Mapeamentos 2007 (ano base) e 2010, e alteração de mudanças entre as classes mapeadas.....	40
Tabela 5 - As dez maiores precipitações pluviométricas em 24 horas.....	53
Tabela 6 - Caracterização das sub-bacias do rio dos Macacos.....	60
Tabela 7 – Comparação entre lâminas observadas e lâminas simuladas.....	73
Tabela 8 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos em abril de 2019 na Gávea. Fonte: Indicadas na tabela	75
Tabela 9 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos em abril de 2019 no Horto. Fonte: Indicadas na tabela	76
Tabela 10 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos em abril de 2019 no Jardim Botânico. Fonte: Indicadas na tabela.....	77
Tabela 11 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos em abril de 2019 na Lagoa Rodrigo de Freitas. Fonte: Indicadas na tabela.....	78
Tabela 12 – Interpretação das lâminas de inundação registradas do evento de 2019.	87
Tabela 13 - Interpretação das lâminas de inundação registradas do evento de 2019.	88
Tabela 14 - Interpretação das lâminas de inundação registradas do evento de 2019.	89
Tabela 15 - Informações dos reservatórios de encosta e resultados da simulação de TR 25.	107



Tabela 16 - Alternativas de soluções propostas.....	112
Tabela 17 - Resumo de resultados.....	148



1 INTRODUÇÃO

As inundações urbanas são problemas cada vez mais recorrentes nas grandes metrópoles, provocadas por chuvas intensas, e que trazem muitos problemas como danos materiais e colocam em risco a vida dos moradores locais (IBGE, 2014).

Há inúmeras causas para a ocorrência das inundações, de acordo com MIGUEZ *et al.*, (2012), das quais pode-se destacar como mais recorrentes a deficiência no sistema de drenagem e o não planejamento da urbanização. Além disso, Miguez destaca que

o processo de ocupação urbana provoca, deste modo, mudanças significativas na situação original de equilíbrio e no balanço hídrico da bacia. A substituição da vegetação natural por áreas construídas impermeabilizadas modifica as parcelas do balanço hídrico da região, fazendo diminuir a possibilidade de infiltração e aumentando o volume superficial de água disponível para escoamento.

(MIGUEZ *et al.*, 2012, p.4)

Logo, analisando o atual cenário brasileiro, o planejamento urbano inadequado e o incorreto planejamento do sistema de drenagem traz como consequência um alto nível de degradação ambiental das bacias hidrográficas, que por sua vez, ocasiona a degradação do próprio espaço urbano pelas inundações (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Neste contexto está inserida a bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas, localizada na Zona Sul do Rio de Janeiro. Desde a chegada da família real, no início do século XIX, a região passou por muitas transformações, como exemplo, a ocupação da área por indústrias têxteis com suas vilas operárias, fazendo com que os bairros da Gávea de Jardim Botânico se tornassem uma das regiões mais industrializadas da cidade. Desde então, os principais cursos d'água da região (Rio Cabeças, Rio Algodão, Rio dos Macacos, Rio Rainha etc.) tiveram suas



seções hidráulicas reduzidas (pelo intensivo processo de canalização) e calhas secundárias suprimidas pelo avanço da urbanização.

A bacia do Rio dos Macacos é a principal sub-bacia hidrográfica a desaguar na Lagoa Rodrigo de Freitas. Ela contém, em sua área de drenagem, parte dos bairros do Jardim Botânico, Lagoa, Gávea e Alto da Boa Vista. Esta região apresenta uma grande área verde, com predominância de florestas e com uma concentração urbana nas áreas baixas, próximas a Lagoa Rodrigo de Freitas. Outra característica da região é o seu clima tropical, em que o estado do Rio de Janeiro está localizado na zona tropical da borda oriental da América do Sul, facilitando a ocorrência de eventos pluviométricos intensos.

Portanto, diversos fatores tornam a cidade do Rio de Janeiro, sobretudo o bairro do Jardim Botânico, palco de recorrentes falhas do sistema de drenagem urbana, desdobrando em inundações.

Este trabalho tem como finalidade propor um projeto de mitigação de inundações, a nível conceitual, na Bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas, com foco no bairro do Jardim Botânico, através de estudos hidrológicos e hidrodinâmicos. Serão discutidas medidas estruturais para reestruturações e complementações dos elementos de drenagem urbana e manejo de águas pluviais. Para validar o projeto e quantificar seus resultados serão realizadas simulações matemáticas da situação atual e das alternativas através do Modelo de Células de Escoamento (MODCEL).



1.1 Motivação

O Bairro do Jardim Botânico é um dos cartões postais da cidade do Rio de Janeiro. Porém, devido a problemas no sistema de drenagem, principalmente o de macrodrenagem, é um local com alta ocorrência de acúmulos de água em regiões urbanas. Projetos de drenagem de águas pluviais no local ainda não são suficientes para solucionar o problema e, por conta disso, no período de chuvas intensas, as enchentes se tornam frequentes.

A enchente ocorrida em abril de 2019 é considerada uma das piores da história do bairro Jardim Botânico, além disso, bairros vizinhos, como a Gávea, também sofreram com a chuva intensa. Diversos prejuízos foram ocasionados pelo evento citado. Muitos que trabalhavam e estudavam na região ficara sem locomoção até suas residências, sendo necessário aguardar pelo fim da chuva e drenagem de toda água acumulada, conseqüentemente, muitos precisaram procurar abrigo para passar a noite.

Portanto, fica evidente a necessidade de analisar estratégias de manejo de águas pluviais para o bairro Jardim Botânico e seu entorno, para assim, elaborar um conjunto de medidas estruturais necessárias, com o propósito de sanar o transtorno causados pelas fortes chuvas.

Este trabalho foi elaborado em parceria com o Escritório Modelo do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (EMDEC).



1.2 Objetivo

Esta seção apresenta os objetivos gerais e específicos do presente trabalho de conclusão de curso.

1.2.1 Objetivo geral

Propor um projeto conceitual para mitigação das inundações na Lagoa Rodrigo de Freitas, com foco na sua região mais crítica, o bairro do Jardim Botânico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma revisão teórica de conceitos relacionados à drenagem urbana, necessários para o desenvolvimento do projeto, como: microdrenagem; macrodrenagem; soluções estruturais; e soluções não estruturais;
- Levantar dados históricos referentes a eventos de falhas de drenagem registrados na região de estudo do caso;
- Realizar estudos hidrológicos na bacia hidrográfica que contribuí para a região estudada;
- Calibrar o modelo hidrológico-hidrodinâmico desenvolvido no software MODCEL para a bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas;
- Desenvolver, a partir do modelo hidrológico-hidrodinâmico, o diagnóstico da situação atual do funcionamento do sistema de macrodrenagem da área de estudo;
- Conceber, simular, comparar e discutir os cenários de projeto de mitigação de inundações.



1.3 Escopo do trabalho

Além da introdução, apresentada neste capítulo 1, que apresenta a motivação, objetivos e metodologia geral do trabalho, serão apresentados a seguir os demais capítulos que compõem o presente trabalho final de conclusão de curso.

O capítulo 2 apresenta conceitos básicos sobre o sistema de drenagem urbana e de enxurradas, inundações e alagamentos e as consequências trazidas por estes eventos. Além disso, serão apresentados os possíveis efeitos causados pela urbanização acelerada e mal planejada. Por fim, serão classificadas as ações com o objetivo de mitigar cheias.

O capítulo 3 apresenta a área de estudo na bacia hidrográfica Rodrigo de Freitas. O presente capítulo detalha a principal bacia hidrográfica da região, a bacia do Rio dos Macacos, trazendo elementos a respeito de sua localização, suas características físicas e hidrográficas, bem como informações a respeito do regime pluviométrico. Adicionalmente, o último tópico deste capítulo apresenta um histórico dos principais eventos pluviométricos que ocasionaram falhas no sistema de drenagem da região de estudo.

O capítulo 4 apresenta a metodologia adotada para a elaboração do presente trabalho que consistiu na execução de duas etapas principais. Na primeira etapa, realizada no software QGIS, constituiu-se no aprimoramento da base de dados elaborada para representação da bacia em modelo matemático da bacia hidrográfica da região em análise. Já a segunda etapa, feita no software MODCEL, consistiu na calibração do modelo, simulação do diagnóstico e dos cenários de projeto.

No capítulo 5 serão analisados os resultados obtidos nas simulações e, assim, definindo o conjunto de medidas que irá compor o cenário principal de mitigação das inundações. Por fim, o capítulo 6 será feita a discussão dos resultados e considerações finais a respeito do trabalho desenvolvido.



2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica dos temas relacionados ao manejo de águas pluviais e sistema de drenagem urbana.

2.1 Água e Cidades

Para entender a importância dos rios nas grandes civilizações da história da humanidade, é necessário compreender como nasceram as primeiras cidades. No início da civilização humana, as pessoas costumavam deslocar-se em busca de abrigos que fornecessem os recursos vegetais e animais essenciais para sua subsistência. Contudo, quando esses recursos se esgotavam, era preciso encontrar um novo local. Diante desse desafio, surgiu a necessidade de identificar um ambiente propício para cultivar alimentos e criar animais, minimizando assim a demanda por energia e os perigos associados à migração. Foi nesse contexto que as primeiras comunidades começaram a perceber que áreas próximas a corpos d'água reuniam as condições necessárias para a sobrevivência. Como exemplo, temos o chamado Crescente Fértil, irrigado pelos rios Jordão, Eufrates, Tigre e Nilo, que compreende hoje os territórios de Palestina, Israel, Jordânia, Kuwait, Líbano e Chipre, além de partes da Síria, do Iraque, do Egito, do sudeste da Turquia e sudoeste do Irã. O Crescente Fértil foi onde as primeiras grandes civilizações se desenvolveram. Além do uso da água dos rios para agricultura e próprio consumo, o transporte através de navegação se tornou bastante comum (TUCCI et al., 2003).

A lógica do crescimento urbano às margens dos rios caracterizou diversas civilizações espalhadas pelo planeta. Porém, o crescimento das cidades de forma desordenada fez com que o destino de efluentes doméstico e industriais fossem descartados nos rios (POLI, 2013). Além disso, a substituição da vegetação natural por áreas construídas impermeabilizadas modificou as parcelas do balanço hídrico da região, fazendo diminuir a possibilidade de infiltração e aumentando o volume superficial de água disponível para



escoamento. Isso fez com que as inundações se tornassem cada vez mais frequentes.

Conforme Miguez, Veról e Rezende (2015), a expansão da urbanização em bacias hidrográficas resulta em intervenções antrópicas que, frequentemente, agravam consideravelmente os episódios de inundação nas cidades. Os principais fatores agravantes desses eventos e suas consequências podem ser identificados como a retirada da cobertura vegetal, impermeabilização do solo, canalização, ocupação de áreas potencialmente alagáveis, resíduos sólidos, favelização e intervenções urbanas físicas nos cursos d'água.

A presença de cobertura vegetal desempenha um papel de grande relevância ao interceptar as águas pluviais e reter uma parte significativa do volume precipitado. A remoção da vegetação resulta no aumento do volume de chuva efetiva, uma vez que a porção anteriormente retida pela vegetação e posteriormente evaporada e transpirada agora contribuirá para o escoamento superficial, conforme ilustrado na figura 1.

a. BALANÇO HÍDRICO

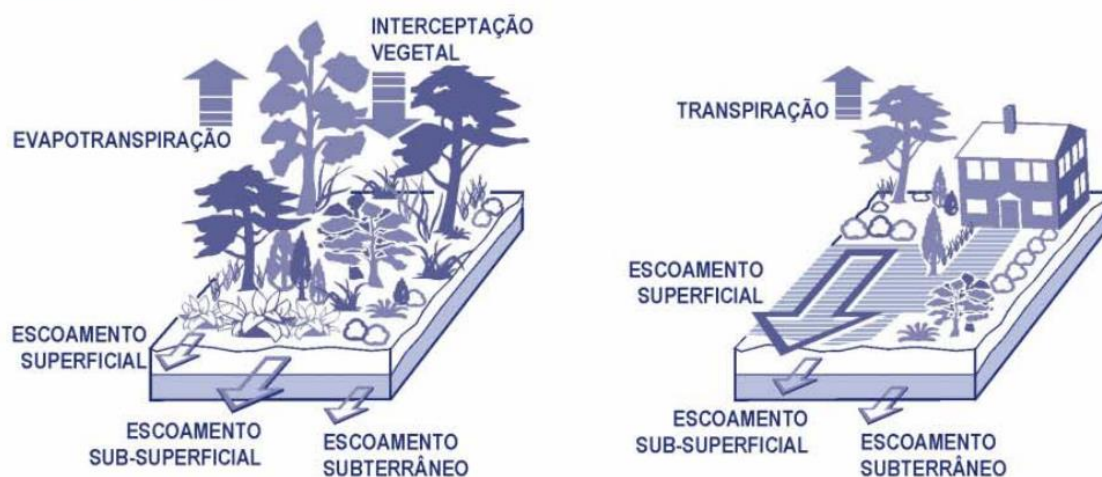


Figura 1 – Alterações do ciclo hidrológico de uma área rural para urbana
 Fonte: Schueler apud Paraná (2002).



A impermeabilização é amplamente reconhecida como o principal efeito decorrente do processo de urbanização. A substituição da cobertura vegetal por pavimentos praticamente impermeáveis, como asfalto e concreto, resulta em uma redução significativa da capacidade de infiltração do solo, além de provocar um aumento expressivo do escoamento superficial e da velocidade de escoamento, conforme ilustrado na figura 2. Entretanto, é importante ressaltar que o efeito da impermeabilização na bacia hidrográfica tende a diminuir à medida que aumenta o tempo de recorrência da chuva. Em condições de chuvas intensas e prolongadas, a parcela do escoamento infiltrado é reduzida, uma vez que o solo atinge sua capacidade de infiltração máxima devido à saturação. Nesse contexto, a bacia hidrográfica não urbanizada apresenta um comportamento relativamente semelhante àquela que passou pelo processo de urbanização (HOLLIS,1975).

A canalização é uma medida que visa primordialmente aumentar a capacidade hidráulica da rede de drenagem, acelerando o escoamento das águas e, muitas vezes, resultando na transferência dos problemas de inundação para as áreas localizadas a jusante da intervenção. Além disso, essa prática também pode reduzir a capacidade de armazenamento na calha dos rios, especialmente quando suprime os canais secundários, resultando em um aumento do volume de água nas regiões mais baixas da bacia hidrográfica.

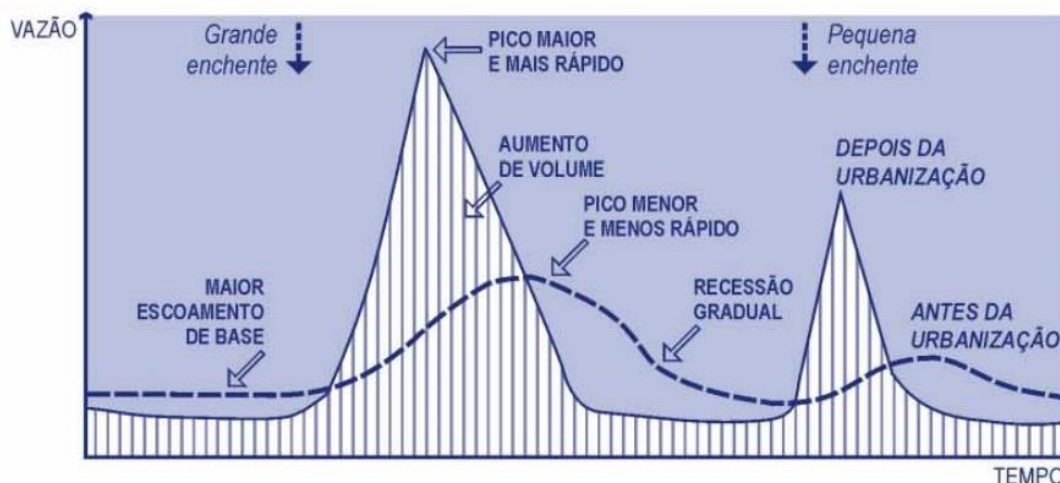


Figura 2 – Alterações do escoamento superficial de uma área rural para urbana
 Fonte: Schueler apud Paraná (2002).

A ocupação de áreas suscetíveis a inundações, como as margens dos rios e áreas de menor altitude na cidade, resulta na redução da capacidade de escoamento do canal. Durante eventos de cheias, é comum que a calha principal do curso d'água transborde para a calha secundária. No entanto, devido a problemas como a falta de planejamento adequado da ocupação do território, além da falta de políticas públicas habitacionais, essas áreas frequentemente estão ocupadas. Isso significa que, para um mesmo evento de cheia, a ocupação da calha secundária do curso d'água resulta em um aumento no limite da área de inundação. A redução da área disponível para o escoamento, devido à ação antrópica, leva ao aumento do nível do curso d'água, resultando no alagamento de áreas que anteriormente não eram propensas a inundação, conforme ilustrado na Figura 3.

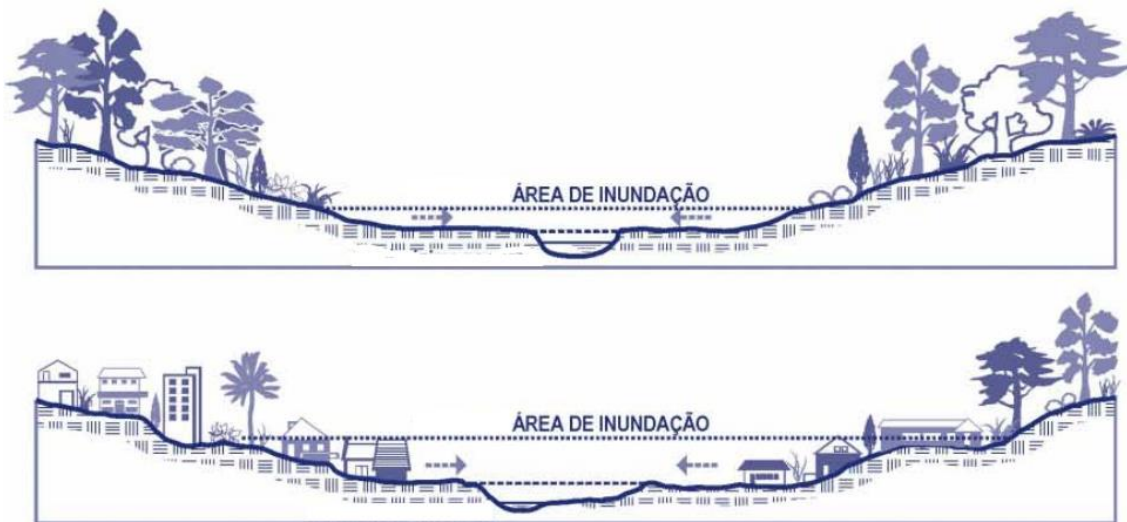


Figura 3 – Alterações da área inundada de uma área rural para urbana

Fonte: Schueler apud Paraná (2002).

O acúmulo de resíduos sólidos em pontos de estrangulamento do escoamento é responsável pela redução da capacidade de condução da vazão em determinados trechos, resultando em um efeito de remanso a montante e, conseqüentemente, ocasionando inundações nessas regiões.

A favelização é um fenômeno associado aos desafios socioeconômicos de países em desenvolvimento. A ocupação de áreas de encosta tem como consequência a diminuição do amortecimento de cheias na cabeceira da bacia hidrográfica, além de introduzir um risco adicional, como deslizamentos de terra causados pela ausência de cobertura vegetal original. A falta de infraestrutura urbana nessas áreas, a ausência de equipamentos e serviços básicos, juntamente com o uso inadequado do solo, muitas vezes ocupando áreas públicas destinadas ao amortecimento de cheias, intensifica o impacto dos resíduos sólidos e a ocupação das várzeas de inundações na bacia hidrográfica.

Por fim, as intervenções físicas nas vias fluviais, como a construção de pontes, aterros e travessias, diminuem a capacidade de condução da vazão, agravando o efeito de remanso a montante.



De acordo com Oliveira (2022), existem diversos argumentos fundamentais que estão associados ao ciclo de degradação das cidades pelas inundações. Esses argumentos citados acima desempenham um papel crucial na ocorrência de problemas como inundações e alagamentos, os quais são diretamente causados pelas modificações realizadas nas bacias hidrográficas urbanas. Essas alterações resultam em uma série de consequências negativas que afetam de maneira significativa os principais sistemas de serviços providos pelas cidades, além de gerar perdas econômicas de considerável valor, incluindo a depreciação da infraestrutura urbana, dando origem ao ciclo que pode ser visto na figura 4. É importante destacar que essa interrelação entre as transformações na bacia hidrográfica, os eventos de inundação e os impactos socioeconômicos são elementos essenciais a serem considerados na busca por soluções eficazes e abrangentes para o desenvolvimento sustentável das áreas urbanas.



Figura 4 – Ciclo de degradação ocasionado pelo inadequado processo de urbanização sem contar o sistema de manejo de águas pluviais
 Fonte: Oliveira (2018)



De acordo com o relatório o *The Human Cost of Disasters: an overview of the last 20 years* entre 2000 e 2019 o número de ocorrências de inundações urbanas aumentou 234% em comparativo com o período de 1980 a 1999. Além disso, nos últimos 20 anos as inundações urbanas equivalem 44% dos eventos de desastres ocorridos em todo o mundo, em que afetou aproximadamente 1,65 bilhão de pessoas, conforme pode ser verificado na Figura 5.

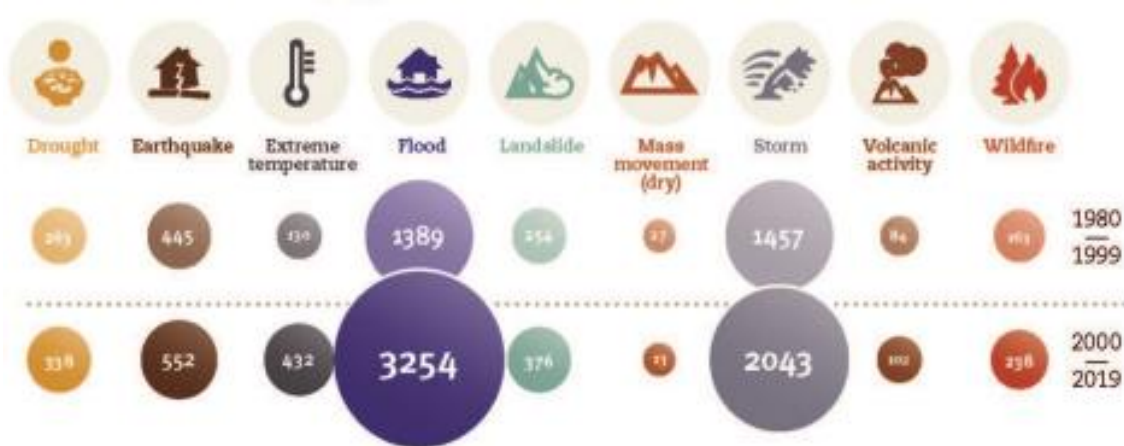


Figura 5 – Comparativo entre o número total de desastres por tipo nos períodos de 1980 a 1999 e de 2000 a 2019

Fonte: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (2020, p.7)

2.2 Manejo de águas pluviais e sistema de drenagem urbana

Segundo o Marco Legal do Saneamento Básico (BRASIL, 2020), consideram-se serviços públicos de manejo das águas pluviais urbanas os serviços conformados por uma ou mais das atividades de: (1) drenagem urbana; (2) transporte de águas pluviais urbanas; (3) detenção ou retenção de águas pluviais urbanas para amortecimento de vazões de cheias; e (4) tratamento e disposição final de águas pluviais urbanas.

Segundo o mesmo Marco Legal, o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, compõe um dos quatro setores do saneamento básico e 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, 2020, Art. 3º Parágrafo I)

Miguez *et al.* (2016) destacam que a drenagem urbana pode ser definida como as ações e medidas que tem o objetivo de mitigar os riscos e prejuízos das comunidades diante do excesso de água pluvial e deve fazer parte de um plano integrado para o desenvolvimento urbano harmônico e sustentável.

O sistema de drenagem urbana pode ser dividido por dois tipos de infraestrutura, sendo eles, a rede de microdrenagem e rede de macrodrenagem.

O sistema de macrodrenagem urbana é formado por rios, córregos, canais e grandes galerias, compondo assim a hidrografia da bacia (REZENDE, 2010). Ainda de acordo com Rezende (2010), essas estruturas que compõem o sistema de macrodrenagem são pré-dimensionados para tempos de retorno entre 10 e 100 anos.

De acordo com Miguez *et al.* (2016), o sistema de microdrenagem é capaz de coletar de forma distribuída sobre a bacia as águas provenientes das chuvas, sem gerar alagamentos locais e transferem suas águas escoadas em direção a uma rede principal de macrodrenagem, que também com capacidade adequada, contribui com um escoamento seguro para as águas nela concentradas até a descarga no corpo receptor. As estruturas que compõem o sistema de microdrenagem são dimensionados para tempos de retorno entre 2 e 10 anos (TOMINAGA, 2013). As ruas, sarjetas e galerias fazem parte do sistema de microdrenagem.

Complementarmente, Miguez *et al.* (2016) destacam a relação entre ambos os sistemas, citando que o sistema de macrodrenagem é responsável por definir a



seção de escoamento necessária para conduzir os efluentes resultantes do sistema de microdrenagem.

Em relação à micro e à macrodrenagem, a maioria das cidades brasileiras adotaram um conjunto de atividades e infraestruturas que focaram na captação, condução e transporte das águas pluviais com a finalidade de prevenir impactos sociais, ambientais e econômicos na ocorrência de eventos pluviométricos extremos (SNIS, 2019). Porém, como pode ser observado na prática, tais ações convencionais não vêm sendo tão efetivas.

Na década de 1960 o sistema de drenagem urbana realizado com técnicas convencionais começa a ser questionado, visto que tais técnicas fazem com que o problema de inundação seja deslocado de áreas de montante para jusante. Sendo assim, os projetos de sistemas de drenagem convencional ou tradicional se destinam aos rios e pouco se importam com às questões relacionadas ao escoamento gerado nas superfícies impermeáveis geradas pelas ocupações (POMPÊO, 2000). Sendo assim, conforme pode ser visto no tópico “Soluções não estruturais e estruturais”, novas maneiras de como tratar o sistema de drenagem vêm sendo pensadas desde então.

2.2.1 Chuva de Projeto

Como mencionado no tópico anterior, o sistema de drenagem urbana tem como seu principal objetivo mitigar os riscos e prejuízos das comunidades diante do excesso de água pluvial (Miguez *et al.* 2016). Porém, como as chuvas são fenômenos naturais – que apresentam diversos padrões e comportamentos de precipitações no tempo e no espaço – os projetos devem levar em conta um padrão da precipitação de chuva, para o qual o sistema de drenagem terá capacidade suficiente para lidar com o volume de escoamento superficial gerado. Este padrão de chuva é chamado de *chuva de projeto*.

De acordo com Miguez, Veról e Rezende (2015), para estudar uma chuva de projeto são necessários alguns dados, como: área de abrangência (área de



drenagem que recebe a chuva), tempo de duração da chuva e probabilidade de ocorrência. Ainda de acordo com os autores, a intensidade das chuvas é um elemento que também deve ser considerado no estudo da chuva de projeto, em que apresenta três princípios gerais:

- A intensidade da chuva é diretamente proporcional ao tempo de recorrência;
- A intensidade da chuva é inversamente proporcional à duração do evento pluviométrico; e
- O evento pluviométrico apresenta uma perda exponencial à medida que a área de abrangência aumenta.

Com isso, a primeira providência a ser estabelecida é o nível de segurança exigido para o sistema, de acordo com o tempo de recorrência. O tempo de recorrência é o período em que determinado evento poderá ser igualado ou superado, em que é relacionado à frequência de ocorrência desse evento, conforme apresentado na Equação 1.

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

As variáveis da Equação 1 correspondem a:

TR: Tempo de recorrência (anos);

f: Frequência de ocorrência do evento TR em um ano.

Ou seja, se uma chuva é igualada ou excedida em média a cada 25 anos, ela terá um tempo de recorrência de 25 anos, e sua probabilidade de ocorrência em 1 ano qualquer isoladamente é de 4 %. Logo, quanto maior o tempo de recorrência do projeto, maior será a segurança e o investimento de construção da estrutura. Por conta disso, deve-se avaliar a segurança requerida e o investimento do projeto, para determinar o tempo de recorrência para o qual será dimensionado o sistema de drenagem.



Há distintas formas onde o sistema de drenagem pode ser instalado, e o tempo de recorrência está diretamente relacionado ao sistema adotado. Por conta disso, a Tabela 1 apresenta alguns TRs recomendado dependendo da característica do sistema.

Tabela 1 - Tempo de recorrência para chuvas de projeto em sistemas de drenagem

Características do sistema	Tr (anos)
Microdrenagem	2 a 10
Macro drenagem	25 a 50
Grandes corredores de tráfego e áreas vitais para a cidade	100
Áreas onde se localizam instalações e edificações de uso estratégico, como hospitais, bombeiros, polícia, centros de controle de emergências, etc.	500
Quando há risco de perdas de vidas humanas	100 (mínimo)

Fonte: SÃO PAULO (2012) apud Miguez, Veról e Rezende (2015)

Em relação ao conceito de tempo de concentração segundo Miguez, Veról e Rezende (2015), refere-se ao período de tempo transcorrido desde o início da precipitação até que toda a bacia hidrológica seja abrangida pela chuva, de modo que a vazão na seção estudada seja influenciada por toda a área da bacia.

Nesse sentido, o tempo de concentração é composto por duas partes distintas: o tempo de equilíbrio e o tempo de viagem. O tempo de equilíbrio corresponde ao período necessário para que o escoamento superficial atinja uma condição estável, enquanto o tempo de viagem refere-se ao deslocamento do escoamento superficial desde o ponto mais a montante da bacia até o seu exutório.

Portanto, é essencial determinar a duração da chuva de projeto de acordo com o tempo de concentração da bacia, a fim de abranger todo o escoamento gerado pela mesma. Dessa forma, em muitos casos, a chuva de projeto deve ser programada considerando um tempo igual ao tempo de concentração da bacia,



garantindo assim uma análise abrangente dos processos hidrológicos e uma avaliação adequada dos riscos associados.

2.2.2 Falhas no sistema de drenagem

De acordo com Miguez *et al.* (2016), problemas como mau dimensionamento de estruturas de microdrenagem e/ou macrodrenagem, falta de manutenção, envelhecimento da rede, perda de capacidade devido crescimento urbano e a ocorrência de chuvas com lâmina d'água precipitada maior que a de projeto são alguns dos motivos que levam a falha do sistema de drenagem.

Dentro dos conceitos de drenagem urbana, as tipologias que são classificadas como falhas, segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), são as enxurradas, inundações e alagamentos.

Enxurradas e inundações são eventos de natureza hidrometeorológica classificados como desastres de causas naturais que afetam diversas regiões, sendo elas rurais e urbanas (CARVALHO, 2007).

Para um melhor esclarecimento, podemos definir as tipologias de falha de drenagem de acordo com Miguez, Veról e Rezende (2015):

- Enxurradas: Estão associados à falha da macrodrenagem, sendo eventos caracterizados por rápida velocidade de ocorrência e chuvas intensas e concentradas, com grande poder de destruição. Normalmente ocorrem em vales fluviais de relevo.
- Inundações: Estão associados à falha da macrodrenagem, quando ocorre o extravasamento dos rios e canais, podendo atingir áreas em torno e durar longos períodos.
- Alagamentos: Estão associados à falha de microdrenagem, quando o sistema não é capaz de captar e transportar águas pluviais de forma eficiente. Na maioria dos casos, os impactos são locais.



Os problemas gerados pela falha de drenagem no Brasil são encontrados com frequências nos grandes centros urbanos, visto que o número de núcleos habitacionais em regiões irregulares é alto, faz com que terrenos marginais de cursos d'água sejam ocupados (CARVALHO *et al.*, 2007). Geralmente, ocupações irregulares apresentam maior vulnerabilidade aos impactos das inundações, provocando impactos às edificações em mal estado de conservação, baixa qualidade, além de estar localizado em áreas de riscos. Estes impactos podem apresentar um nível de prejuízo baixo em comparação com edificações regulares, porém a recuperação dos bens por parte desta população é um grande obstáculo em que muitas ficam sujeitas a exposição de inundações (Guimarães, 2016).

2.3 Diferentes abordagens na drenagem urbana

Segundo Fernandes (2002), em uma breve retrospectiva da história dos sistemas sanitários, os primeiros sistemas de drenagem desenvolvidos pelo ser humano foram criados com o propósito de salvaguardar as áreas agrícolas contra os efeitos das chuvas. Nas vilas, eram utilizados para desviar as águas das áreas residenciais e de circulação, devido à ausência de redes regulares de esgoto doméstico. Nas cidades gregas e romanas, a prestação dos serviços de saneamento era prioridade nas áreas nobres, e os moradores dessas áreas eram responsáveis pelo pagamento pelo seu uso. No final do século XII, a construção de sistemas de drenagem pública e de encanamentos subterrâneos para águas servidas tinha como objetivo principal a pavimentação das ruas em cidades europeias, como Paris (1185), Praga (1331), Nuremberg (1368) e Basileia (1387) (PDMAP, 2013).

No período do Renascimento (século XVI), o aumento da poluição dos mananciais de água tornou o destino dos esgotos e do lixo urbanos um grande problema. Com a Revolução Industrial no século seguinte, foram introduzidas máquinas a vapor para o bombeamento e tubos de ferro fundido para o



abastecimento de água urbana, além da criação de empresas fornecedoras de água na Europa (PDMAP, 2013).

Segundo o Plano diretor de manejo de águas pluviais da cidade do Rio de Janeiro (2013), durante as décadas de 1830 e 1840, ocorreram eventos que marcaram a história da engenharia sanitária. A epidemia de cólera em 1831/32 foi um fator determinante para a preocupação com o saneamento nas cidades, já que a doença se propagava com mais força em áreas urbanas densas e poluídas por excrementos e lixo, afetando todas as classes sociais. Nessa época, medidas preventivas como a limpeza e drenagem das casas, o fornecimento de água, o esgotamento sanitário e o afastamento dos resíduos das cidades eram vistos como ações de saúde pública, mais do que de urbanismo, dando origem à abordagem “higienista”.

É notório que a principal solução para os problemas de inundações urbanas, se manteve focada na adequação do sistema de drenagem, na maioria dos casos aumentando as dimensões das galerias já existentes e da canalização e retificação de rios presentes na macrodrenagem, seguindo ainda a lógica higienista. Acelerando assim o processo de transporte das águas para longe do local onde o sistema está sobrecarregado, sendo assim, as autoridades realizam o aprimoramento com o objetivo de garantir que a região não sofra mais com alagamentos oriundos de eventos hidrológicos.

Este recurso utilizado é adequado em um primeiro momento, porém com o crescimento da urbanização em todo o território e, principalmente em áreas mais altas da bacia, aumentam de forma considerável o volume de água captado por toda a rede de drenagem, levando a ser realizadas novas adequações. Com o passar do tempo, a urbanização é tamanha que leva o governo a realizar diferentes tipos de mudanças no sistema na tentativa de amortecer escoamentos e diminuir o impacto da urbanização nas redes de drenagem, dando origem assim a fase corretiva (PDMAP, 2013).



Posteriormente, surge a necessidade de tratamento da poluição ocasionada pelas águas pluviais, e maior atenção à preservação ambiental e restauração dos corpos hídricos. Nesta nova fase, são buscadas ações que insiram a sustentabilidade como um de seus principais fatores no processo de manejo das águas urbanas. Sendo assim, surge, baseada no conceito de drenagem sustentável, uma quebra de paradigma dentro do conceito de aceleração de escoamento, a partir desse momento se estabelece que os processos de drenagem tem o intuito de mitigar o impacto da urbanização no escoamento superficial (PDMAP, 2013).

Com isso, Tucci (2005) nomeou as fases em que o sistema de drenagem foi sendo alterado, conforme o desenvolvimento da sociedade em quatro: Pré-Higienista, Higienista, Corretiva e Desenvolvimento Sustentável. Como podemos ver na Tabela 2:



Tabela 2 - Fase histórica da drenagem urbana

FASE	CARACTERÍSTICA	CONSEQUÊNCIA
<i>Pré-Higienista:</i> Até início do séc. XX	Esgoto em fossas ou diretamente nas ruas, sem coleta ou tratamento	Epidemias e doenças com alta taxa de mortalidade
<i>Higienista:</i> Até os anos 1970	<i>Tout à l'égout</i> – Transporte do esgoto junto às águas pluviais, por canalização dos escoamentos.	Redução das doenças e da mortalidade, degradação dos corpos d'água, contaminação dos mananciais.
<i>Corretiva:</i> Entre 1970 e 1990	Sistema separador absoluto, tratamento dos esgotos, amortecimento dos escoamentos pluviais.	Melhoria da qualidade da água dos rios, poluição difusa, obras de grande impacto.
<i>Desenvolvimento Sustentável:</i> Após 1990	Tratamento do escoamento pluvial, preservação do sistema natural, integração institucional.	Conservação ambiental, melhoria da qualidade de vida, controle das inundações.

Fonte: TUCCI (2005)

Rezende (2018) organiza as técnicas de controle de inundações em dois grupos principais: convencionais; e compensatórias. A Figura 6 apresenta a divisão realizada pelo autor, na qual também são apresentadas as intervenções tipo de cada técnica.

Para as técnicas convencionais destacam-se os projetos de grandes galerias, cortes de meandros e retificações, mudança de declividade de leito de curso d'água e canalização.

Para as técnicas compensatórias são destacadas as alternativas de aumento de infiltração e os reservatórios de águas pluviais.

Permitir que o solo absorva um certo percentual do escoamento superficial é uma tentativa de mitigar a sobrecarga no sistema e uma tentativa de reproduzir a disposição natural (sem urbanização) das águas superficiais. Toda ação que leva a um melhor manejo das águas urbanas pode ser chamando de Sistema de



drenagem sustentável (SUDS), que tem como principais objetivos: 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).

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 e telhados verdes.

Este tipo de estrutura visa substituir grandes estruturas nos projetos de controle de inundação, por pequenas medidas espalhadas por toda bacia, atuando diretamente na fonte da geração do escoamento. Sendo assim, diminuindo o escoamento superficial de forma mais rápida possível, além disso, essas tecnologias são capazes de reduzir o pico de inundação, controlar a poluição e melhorar a comodidade (ARGUE & PEZZANITI, 1999).

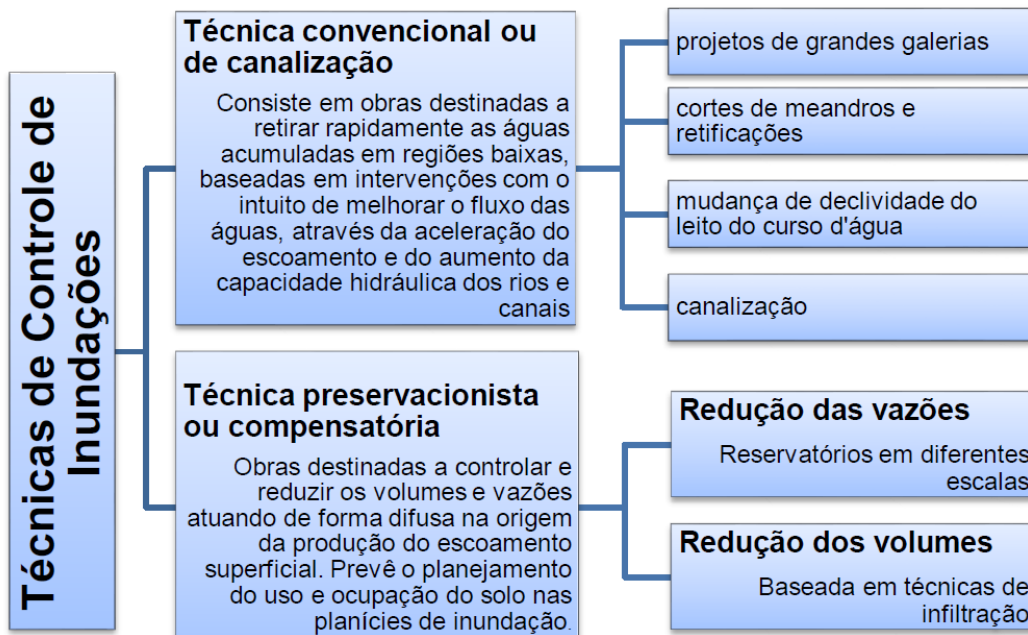


Figura 6- Técnica de controle de inundações
Fonte: Rezende, 2018

Conforme descrito por Oliveira (2018), os reservatórios de retenção desempenham um papel fundamental no gerenciamento dos recursos hídricos. Esses reservatórios são projetados para reter a água de forma permanente, utilizando o recurso hidrológico proveniente de rios e bacias, como é o caso dos lagos de barragens. Dessa maneira, eles desempenham um papel importante na regulação do fluxo hídrico ao longo do tempo, além de aumentar as oportunidades de infiltração retirando parte da água do sistema e devolvendo aos reservatórios do solo.

Por outro lado, os reservatórios de detenção têm como objetivo principal reduzir o pico de vazão em uma bacia hidrológica. Esses reservatórios são projetados para amortecer as vazões que percorrem o curso da bacia, permitindo uma diminuição gradual e controlada do fluxo de água. Essa função desempenhada pelos reservatórios de retenção é crucial para prevenir inundações e minimizar os impactos negativos decorrentes de picos de vazão elevados.



Assim, tanto os reservatórios de retenção quanto os reservatórios de detenção desempenham papéis importantes na gestão dos recursos hídricos, contribuindo para o controle dos fluxos de água e para a mitigação de eventos extremos, como inundações, de forma mais ampla e abrangente.

Segundo ABCP (2013) um reservatório *off-line* ou paralelo é caracterizado por estar localizado fora do curso natural do rio. Geralmente, esse tipo de reservatório é utilizado em áreas com alta densidade populacional, onde é necessário desviar o curso do rio durante períodos de grande vazão. Esses reservatórios têm a capacidade de armazenar volumes consideráveis de água durante essas fases de pico. Sua função principal é controlar as vazões do rio, minimizando o risco de inundações e enchentes nas áreas urbanas próximas.

Por outro lado, os reservatórios *in-line* são construídos sobre ou ao longo do curso natural do rio. Eles têm a finalidade de reservar um determinado volume de água durante um período de tempo específico e liberar gradualmente esse volume de volta para o leito do rio jusante. Essa liberação controlada de água ajuda a atenuar o hidrograma afluente, ou seja, reduz a intensidade dos picos de vazão. Geralmente, os reservatórios *in-line* funcionam por gravidade e não requerem uma operação ativa.

Ambos os tipos de reservatórios desempenham um papel essencial no controle e na gestão dos recursos hídricos. Enquanto os reservatórios *off-line* permitem o armazenamento temporário de grandes volumes de água, os reservatórios *in-line* auxiliam na modulação do fluxo hídrico ao longo do curso do rio, contribuindo para a prevenção de inundações e o gerenciamento dos recursos hídricos de maneira mais ampla e abrangente.

Segundo Paraná (2002) o dimensionamento dos reservatórios de detenção deve procurar que a vazão de contribuição da situação atual, seja amortecida a valores próximos da vazão nas condições preexistentes para o TR de referência, conforme apresentado na Figura 7.

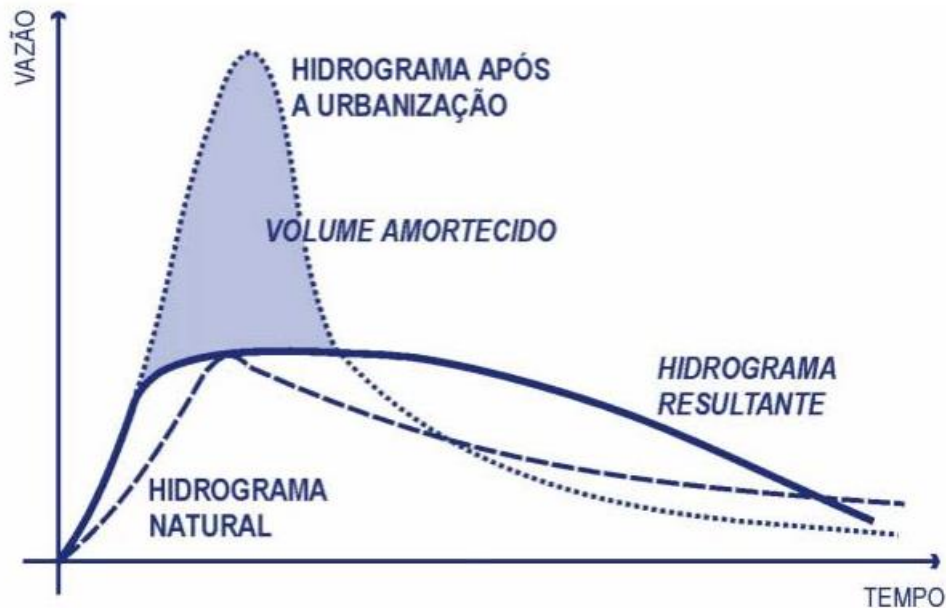


Figura 7 – Amortecimento em reservatórios urbanos.
Fonte: Paraná (2002)

Outra maneira de classificação das intervenções no sistema de drenagem urbana pode seguir os conceitos de medidas estruturais ou não estruturais (ANDRADE, 2004 *apoud* ZAHED FILHO *et al.*, 2012; CANHOLI, 2005).

As soluções estruturais estão ligadas a alterações feitas diretamente no sistema de drenagem urbano, como obras de captação, armazenamento e transporte de águas pluviais, sendo elas divididas na escala de microdrenagem e macrodrenagem.

Além disso, outra forma de caracterizar a solução estrutural está em quanto essa mudança gerará de impacto a toda bacia. Podendo ser uma medida de caráter extensivos, ou seja, a mesma age modificando as formas com que a bacia se relaciona com o meio. Já as medidas intensivas, estão focadas em agir diretamente nos rios de forma à aumentar ou retardar a vazão do escoamento superficial, além disso, atual de forma mais local na bacia, sem gerar impactos em toda sua extensão.



Conforme destacado por Rezende (2018), as soluções não estruturais são caracterizadas por ações que não envolvem alterações nas estruturas do rio ou no sistema de drenagem existente. Essas abordagens visam lidar com os desafios relacionados a enchentes e inundações por meio de medidas que vão além da modificação física do ambiente. Uma das principais soluções não estruturais é o zoneamento urbano, que envolve a identificação e delimitação de áreas propensas a alagamentos.

Outras soluções não estruturais abrangem a educação ambiental da população, buscando aumentar a conscientização sobre os riscos e a importância de práticas sustentáveis de convivência com eventos de enchentes. Isso inclui a promoção de medidas de conservação ambiental, e a disseminação de informações sobre a importância da preservação dos recursos hídricos.

Os sistemas de alertas também desempenham um papel fundamental nas soluções não estruturais (SANTA; VISSIRINI; WERNER, 2018), fornecendo informações em tempo real sobre condições meteorológicas adversas e níveis de rios e córregos. Isso permite que as comunidades estejam preparadas e adotem medidas preventivas diante de possíveis enchentes.

Em suma, as soluções não estruturais representam uma abordagem abrangente para lidar com as enchentes, envolvendo aspectos como planejamento urbano, conscientização ambiental, reservas estratégicas de áreas alagáveis e sistemas de alerta.

Neste trabalho a principal forma de caracterização das soluções estruturais está baseada entre os conceitos de tradicional e compensatória. O conceito tradicional se refere a obras de drenagem que são destinadas a aumentar de forma considerável o escoamento superficial, incrementando a capacidade hidráulica dos rios e canais. Já as compensatórias estão focadas em diminuir a influência da urbanização no sistema, a partir do incremento dos processos de infiltração, evapotranspiração e armazenando as águas pluviais, podendo se



relacionar com os elementos da SUDS (CHARLESWORTH et al., 2003; POLETO & TASSI, 2012).

A Tabela 3 abaixo mostra um comparativo entre canalização e armazenamento, correspondentes a medidas tradicionais e compensatórias, respectivamente.

Tabela 3 – Comparação entre obras de canalização e de armazenamento.

Característica	Canalização	Armazenamento
Função	- Remoção rápida dos escoamentos	- Contenção temporária para subsequente liberação
Componentes principais	- Canais abertos/galerias	- Reservatórios de superfície livres ou subterrâneos - Retenção subsuperficial
Aplicabilidade	- Instalação em áreas novas - Ampliação de capacidade (difícil em centros urbanos)	- Áreas novas (em implantação) - Áreas existentes (se houver áreas disponíveis)
Impacto à jusante (quantidade)	- Aumento expressivo dos picos de enchente em relação à condição anterior - Maiores dispêndios nos sistemas a jusante	- Áreas novas: pode ser dimensionado para impacto zero (legislação USA e Reino Unido) - Reabilitação de sistemas: vazões à jusante compatíveis com a capacidade disponível
Impacto à jusante (qualidade)	- Transporte de toda carga poluente para o corpo receptor	- Facilita remoção de material flutuante e de sólidos suspensos (sedimentação)
Manutenção/operação	- Manutenção na ocorrência de assoreamento e deposição de lixo - Difícil acessibilidade	- Necessita de limpeza e fiscalização periódicas - Sistema de bombeamento eventual (operação) - Desinfecção eventual (insetos)
Estudos hidráulicos/hidrológicos	- Definição dos picos de enchentes	- Definição dos hidrogramas e volumes das enchentes

Fonte: CANHOLI (1995) *apud* NAKAZONE (2005)

Um exemplo importante de medidas de armazenamento dentro da realidade do estado do Rio de Janeiro, são os piscinões que foram construídos na região do Maracanã e da Praça da Bandeira, áreas conhecidas pelas suas constantes inundações. De maneira a melhor representar a realidade do município onde

está incluído o estudo de caso, o tópico a seguir apresenta um breve histórico do manejo de águas pluviais do município.

Um exemplo adicional de medida de armazenamento é o reservatório do projeto Iguaçu, implementado em 2009 no Rio Dona Eugênia, localizado em Mesquita. Esse reservatório de retenção, situado em uma área de encosta, desempenha um papel crucial no amortecimento de enchentes e na redução do impacto das precipitações. Sua construção representa uma estratégia efetiva para mitigar os riscos associados a eventos pluviais intensos, proporcionando uma maior capacidade de armazenamento temporário da água e contribuindo para a proteção das áreas a jusante.

Essa iniciativa, ilustrada na Figura 8, demonstra a importância de implementar medidas de armazenamento em regiões propensas a inundações, a fim de garantir uma gestão eficiente das águas pluviais e proteger a infraestrutura e comunidades afetadas.

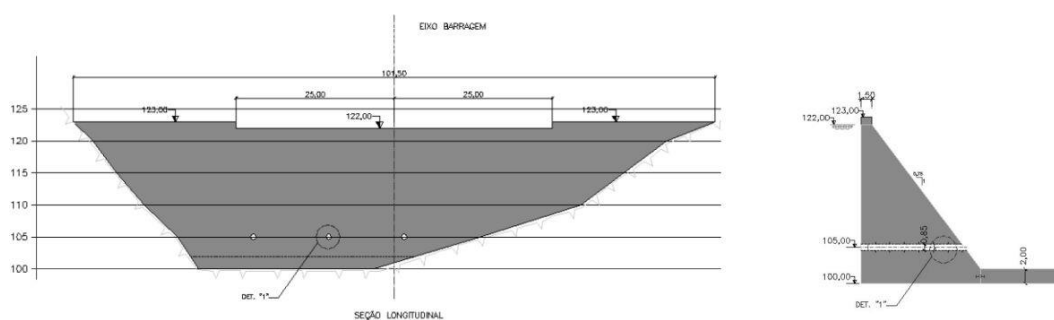


Figura 8 - Reservatório de retenção do Rio Dona Eugênia
Fonte: Projeto Iguaçu, 2009

2.4 Sistema de drenagem do Município do Rio de Janeiro

O Município do Rio de Janeiro tem sido afetado por inundações há décadas, como já mencionado. Essas inundações têm causado danos significativos ao patrimônio público, bem como representado um risco considerável para a



população residente. Infelizmente, essa não é uma questão única do Rio de Janeiro, mas sim um problema enfrentado por muitas cidades em todo o mundo, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. A urbanização excessiva e a falta de planejamento urbano adequado têm levado a um aumento do risco de inundações, agravado ainda mais pelas mudanças climáticas. Soluções integradas e sustentáveis precisam ser implementadas para minimizar o impacto dessas inundações no futuro, protegendo tanto o patrimônio quanto a segurança da população. Os dados a seguir foram adaptados do material disponível no armazém de dados do governo do Rio de Janeiro acerca do plano diretor de manejo de águas pluviais da cidade do Rio de Janeiro, desenvolvido pelo Consórcio Hidrostudio-Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica-SP, sob a coordenação da Secretaria de Obras/Rio-Águas.

Em relação ao histórico do manejo de águas pluviais do município, podem ser destacados os seguintes marcos:

- 1857: Contrato assinado pelo Imperador D. Pedro II para a implantação de uma rede de esgotos e drenagem pluvial, com sistema misto.
- 1857: Início da construção do Canal do Mangue, com o objetivo de drenar um pântano próximo à Cidade Nova, ligando o mar ao Rocio Pequeno (atual Praça Onze de Junho).
- 1864 a 1929: Engenheiro Saturnino de Brito promoveu uma revolução na engenharia sanitária ao aliar a abordagem higienista com a hidráulica de condutos e canais para propor soluções de escoamento das águas pluviais.
- 1902 a 1906: Construção de um sistema de canais artificiais com a retificação dos rios Joana, Comprido e Maracanã que desaguavam no Canal do Mangue; Início da canalização do rio carioca, da Serra do Corcovado até o mar, num total de 2.200 m de galerias.
- 1920 a 1922: Prefeito Carlos Sampaio promoveu várias ações para solucionar problemas de inundações, desobstrução de rios e



urbanização de áreas como a Lagoa Rodrigo de Freitas, a Avenida de Contorno do Morro da Viúva (atual Rui Barbosa), a Av. Atlântica, a remoção do morro do Castelo e a urbanização da Esplanada do Castelo e da Glória.

- 1930: Plano Agache de urbanização com um capítulo dedicado aos problemas sanitários, incluindo uma proposta de solução integrada para problemas de cheias, com ênfase em obras de montante para melhorar o funcionamento das redes de drenagem à jusante.
- 1950: Criação da Ilha do Fundão, uma ilha artificial formada pelo aterro de um pequeno arquipélago.
- 1956 a 1958: Abertura de avenidas associadas à canalização de rios como Faria-Timbó, Maracanã, Joana, Pedras, Jacaré, Ramos e Trapicheiros, obras de saneamento e canalização de rios como Acarai, Lucas, Dom Carlos, Cachorros, Faleiros, Irajá, Méier, Nunes, Piraquara e a dragagem do Canal do Mangue.
- 1996: Criação do Sistema Alerta-Rio, destinado a emitir boletins de alerta a partir do monitoramento em tempo real dos índices pluviométricos em uma rede de 32 postos; Projeto Rio-Cidade, que consistiu na implantação de galerias de drenagem pluvial nas ruas do bairro da Tijuca, canalizando os rios tributários.
- 1998: Criação da Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro - RIO-ÁGUAS, responsável por gerenciar ações preventivas e corretivas para o manejo das águas pluviais.
- As obras de recuperação da Bacia Hidrográfica de Jacarepaguá: iniciadas em 1998 e concluídas em 2008;
- Os reservatórios contra enchentes da Grande Tijuca: iniciados em 2011 e entregues em 2013;
- O desvio do Rio Joana: iniciado em 2014 e concluído em 2016;
- A regulação da concessão municipal de esgotamento sanitário na Zona Oeste: iniciada em 2012 e vigente até 2032.



3 ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo será apresentada a caracterização da bacia hidrográfica da lagoa Rodrigo de Freitas, com foco para a bacia do Rio dos Macacos, seu principal formador, e que engloba o bairro mais crítico em relação às inundações, o bairro Jardim Botânico. Será apresentado o histórico de ocupação da região, a descrição do sistema de drenagem, os motivos que culminam na propensão de inundações, relato de eventos pluviométricos extremos antecedentes, bem como o evento pluviométrico que foi estudado no modelo hidrodinâmico como evento de calibração das simulações.

3.1 Caracterização da área de estudo

O presente tópico apresentará a caracterização da área de estudo com foco na bacia hidrográfica do Rio dos Macacos, apresentando elementos sobre a região, suas características físicas e hidrográficas, informações sobre o regime pluviométrico, e por fim um histórico dos principais eventos pluviométricos que causaram falhas no sistema de drenagem na região.

3.1.1 Localização

O município do Rio de Janeiro é a segunda maior cidade do Brasil, depois de São Paulo, com seus 6 milhões de habitantes. De acordo com o IBGE (2019), a cidade apresenta uma área territorial de 1.200,329 km², onde 640,34 km² é área urbanizada.

O Município do Rio de Janeiro apresenta 33 regiões administrativas que são distribuídas em 4 zonas: Central, Sul, Norte e Oeste. A Zona Sul engloba os bairros de Botafogo, Catete, Copacabana, Cosme Velho, Flamengo, Glória, Laranjeiras, Leme, São Conrado, Urca, Vidigal, e os bairros Gávea, Humaitá, Ipanema, Jardim Botânico, Lagoa, Leblon, Rocinha, que fazem parte da bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas. A Figura 9 apresenta as regiões



administrativas da cidade do Rio de Janeiro, enquanto a Figura 10 apresenta os bairros da Zona Sul com foco na bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas.

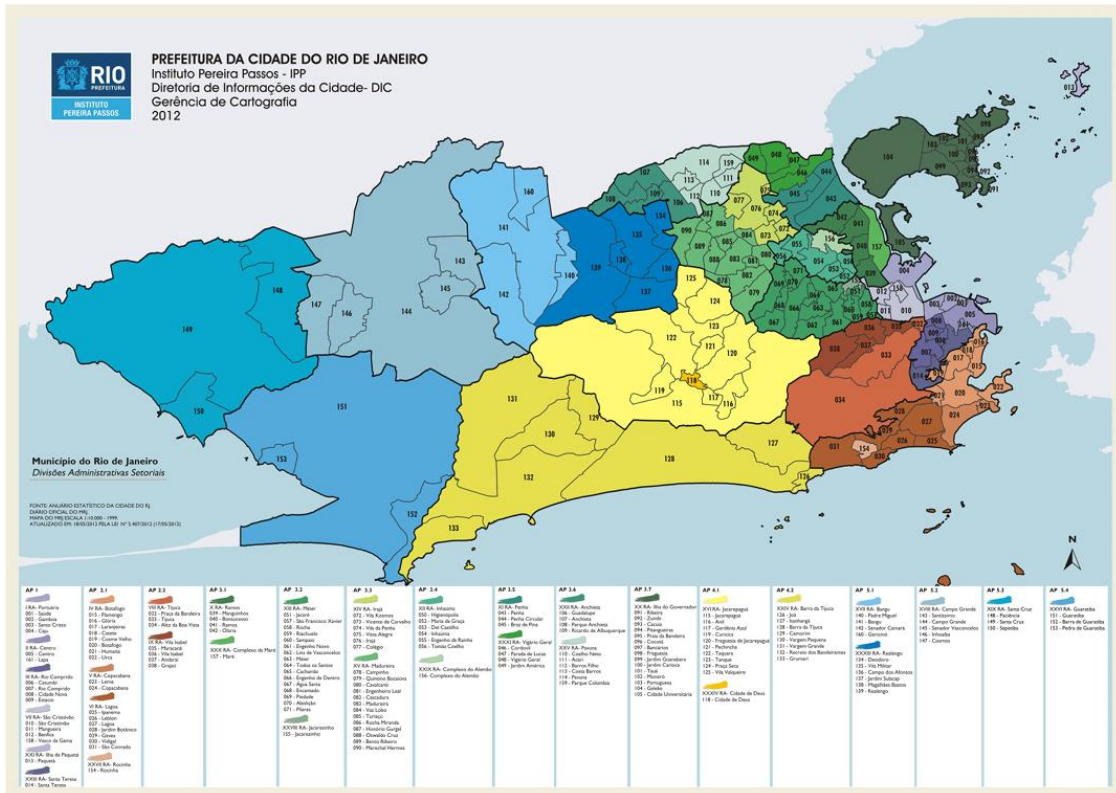


Figura 9 - Mapa das regiões administrativas da cidade do Rio de Janeiro.
 Fonte: Estado do Rio de Janeiro



Figura 10 - Mapa dos bairros da cidade do Rio de Janeiro.
Fonte: Estado do Rio de Janeiro

A bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas faz parte do subcomitê do sistema lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas que, por sua vez, está inserido no Comitê da Bacia da Baía de Guanabara, mesmo não drenando para este corpo d'água. A bacia em questão pode ser vista na Figura 11, na qual é chamada de Sub-bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas. Na figura é possível identificar os principais cursos d'água, com destaque para o Rio dos Macacos e seus afluentes, o Rio Cabeças, Rio Algodão e Riacho do Pai Ricardo. Destaca-se também o Rio Rainha que por meio do Canal do Jóquei contribui para o Rio dos Macacos e depois para a Lagoa Rodrigo de Freitas, ou por meio do Canal Visconde de Albuquerque, contribui para o Oceano Atlântico. Há na bacia também o Canal Jardim de Alah que comunica a Lagoa ao Oceano.

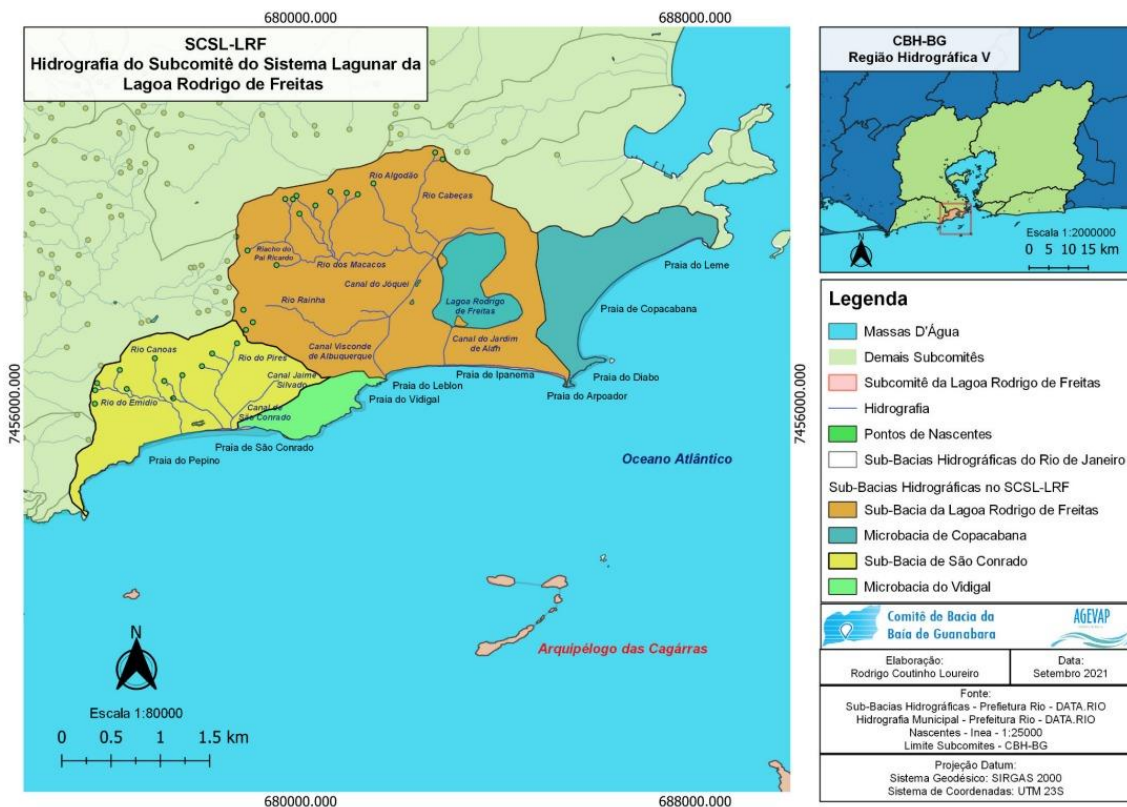


Figura 11 – Divisão das bacias hidrográficas do subcomitê do sistema lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas
 Fonte: Comitê da Bacia da Baía de Guanabara (2021).

A Bacia hidrográfica do Rio dos Macacos contempla partes dos bairros Jardim Botânico, Lago, Alto da Boa Vista e Gávea, com mais de 300 mil habitantes (MIGUEZ *et al.*, 2012). A Figura 12 apresenta a divisão da bacia hidrográfica em questão com uma imagem de satélite na qual é possível observar o uso e ocupação do solo.

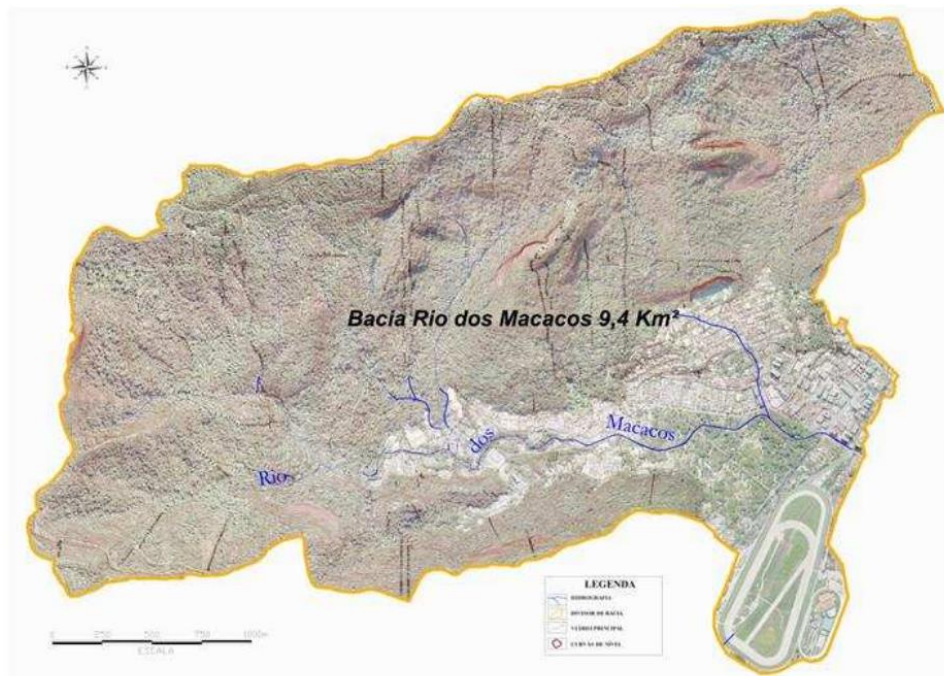


Figura 12 - Localização da Bacia do Rio dos Macacos sobre foto aérea.
 Fonte: Plano Diretor de desenvolvimento Sustentável da Cidade do Rio de Janeiro – PDMAP, 2013

3.1.2 Geologia e geomorfologia

A Geologia do estado do Rio de Janeiro é constituída, em sua grande parte, por um terreno de alto grau metamórfico, com intrusões graníticas, relacionado à faixa Ribeira, um complexo orógeno que foi desenvolvido pelas convergências litosféricas que atuaram entre 1000 a 540 Ma (HEILBRON *et al.*, 2016). Ainda de acordo com Heilbron *et al.* (2016), a faixa Ribeira Central tem uma geologia estrutural complexa, características de orógenos altamente erodidos. Já as rochas metamórficas de alto grau e ígneas de diversas gerações estão organizadas em domínios estruturais onde determinadas parcelas predominam

zonas de cisalhamento dúctil de alta temperatura, e outras predominam dobras fechadas a abertas. A Figura 13 apresenta a compartimentação tectônica para Província Mantiqueira (Setentrional, Central e Meridional) no contexto das faixas orogênicas neoproterozoicas, com destaque para a Faixa Ribeira que ocupa o segmento central desta província, na qual 1 significa Coberturas Fanezoicas, 2 Província Tocantins/Mantiqueira; 3 Domínio Externo; 4 Domínio Interno; 5 Orógenos Apiaí e São Gabriel; 6 Coberturas Neoproterozoicas; e 7 Crátons.

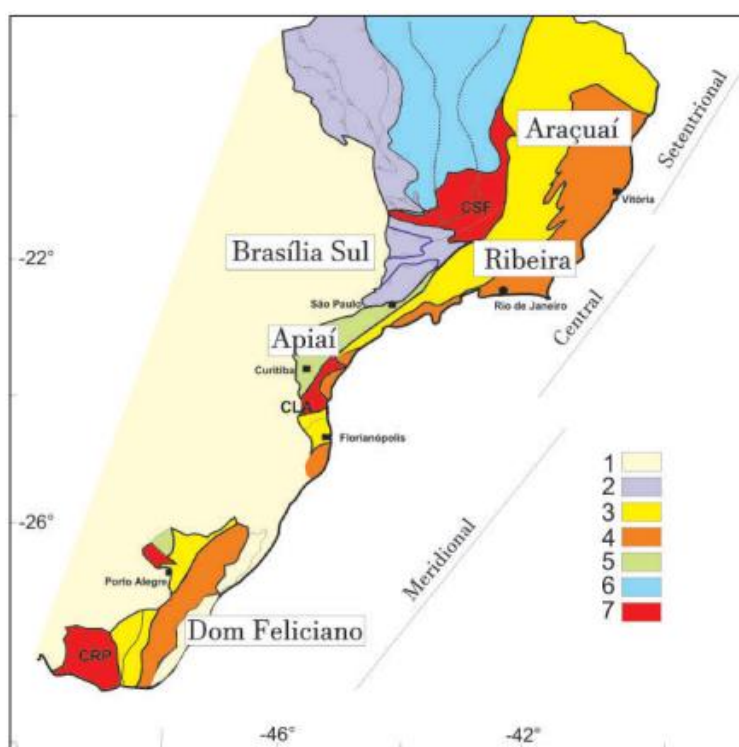


Figura 13 - Compartimentação tectônica para Província Mantiqueira (Setentrional, Central e Meridional) no contexto das faixas orogênicas neoproterozoicas, com destaque para a Faixa Ribeira que ocupa o segmento central desta província

Fonte: Extraído do relatório Geologia e recurso minerais do estado do Rio de Janeiro. Legenda original. Modificada de Heilbron et al. (2004)

Em relação a área da bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, a maior parte é ocupada pelas encostas das serras do corcovado, Carioca e Maciço da Tijuca, em que as elevações podem chegar a cerca de 700 metros, na região do morro do Sumaré, em relação à Lagoa Rodrigo de Freitas, que está no nível do mar

(MIGUEZ *et al.*, 2012). A Figura 14 apresenta o mapa de Geomorfologia na região, na qual se destaca uma área significativa de planícies fluviais e fluviomarinhas a jusante, e serras escarpadas a montante.

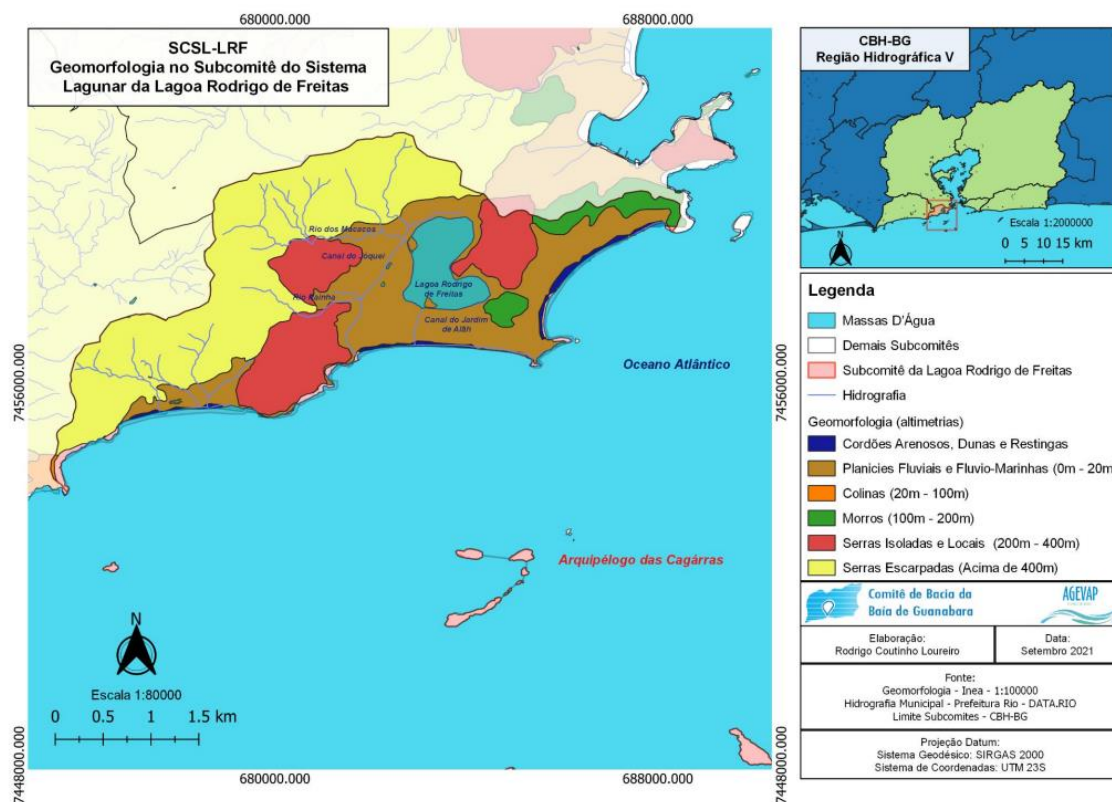


Figura 14 – Geomorfologia na região de abrangência do Subcomitê do Sistema Lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas.
Fonte: Comitê da Bacia da Baía de Guanabara (2021).

3.1.3 Clima

O clima do Rio de Janeiro por ser uma cidade litorânea é bastante influenciada pelas brisas marítimas que vem do oceano atlântico, e devido ao fluxo frequente de ventos, a região é atingida por chuvas convectivas, principalmente entre os meses de verão, de novembro a abril. Neste período do ano é registrado o maior número de enchentes (Nimer, 1989).



A bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, assim como todo o município do Rio de Janeiro, classifica-se na região térmica tropical úmida e está submetida aos efeitos de sistemas frontais e de linhas de instabilidade. De acordo com Nimer (1989), o Anticiclone Tropical Atlântico é um grande motivador às condições climáticas da região de estudo, em que sua ocorrência, na maior parte do ano, se concentra pelo litoral do Rio de Janeiro e Espírito Santo. É um núcleo de alta pressão, ar úmido e pouca nebulosidade, gerando altas temperaturas, de acordo com a Figura 15. O aumento da temperatura resulta em altos índices de evaporação, vindos do oceano atlântico e assim as chuvas convectivas

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	26.7	27	25.9	24.3	21.8	20.8	20.1	20.9	22.2	23.7	24.2	25.8
Temperatura mínima (°C)	23.3	23.3	22.7	21.1	18.2	16.8	16	16.5	18.1	20	21	22.4
Temperatura máxima (°C)	31.2	31.7	30.2	28.5	26.2	25.8	25.4	26.5	27.5	28.6	28.5	30.1
Chuva (mm)	172	117	153	99	81	52	55	45	81	98	143	156
Umidade(%)	79%	78%	81%	81%	81%	80%	79%	76%	75%	76%	80%	80%
Dias chuvosos (d)	12	10	12	10	9	6	6	6	8	9	12	12
Horas de sol (h)	9.8	10.0	8.8	7.9	7.2	7.0	6.9	7.3	7.2	7.4	7.7	8.8

Figura 15 - Dados climatológicos do Rio de Janeiro
Fonte: ClimateData, 2010

3.1.4 Uso e ocupação do solo

A vegetação remanescente na bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas é a Floresta da Mata Atlântica. As encostas das serras onde está localizada a bacia do Rio dos Macacos, possuem densas florestas, entre o Vale do Rio dos Macacos, nas paineiras, na estrada da Sumaré, e parte da floresta da tijuca (MIGUEZ *et al.*, 2012). De acordo com o Instituto Brasileiro de Florestas, a Mata Atlântica corresponde a 13,04% do território Nacional. Alguns estudos apontam que na cidade do Rio de Janeiro, no período por volta do século XVI, possuía 97% do território de cobertura vegetal. Já dados mais recentes, segundo Lisboa e INEA (2015), indicam que há cerca de 1,3 milhões de hectares de mata atlântica dentro do município do Rio de Janeiro, representando 30% do total preservado. A Figura 16 apresenta o mapa de uso e cobertura do solo no estado do Rio de Janeiro,



enquanto a Tabela 4 apresenta os percentuais de mapeamentos de 2007 e 2010, representando a alteração de mudanças entre as classes mapeadas.

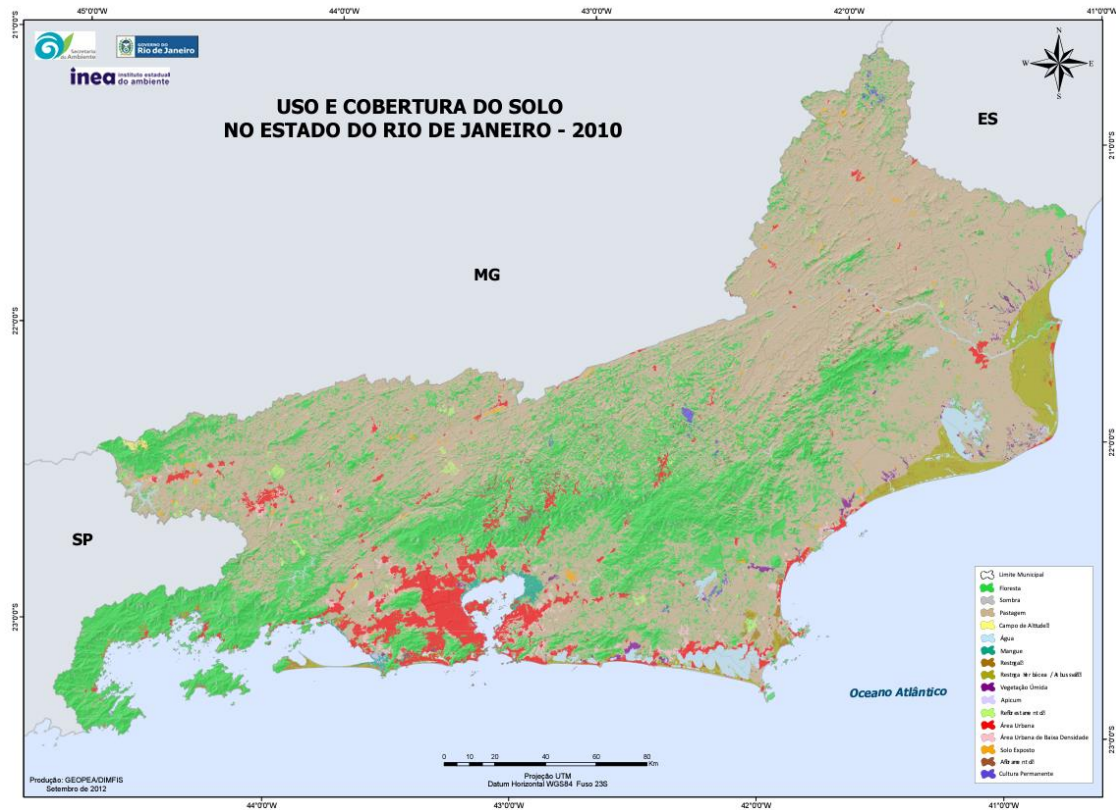


Figura 16 - Uso e cobertura do solo no estado do Rio de Janeiro
Fonte: INEA, 2010



Tabela 4 – Monitoramento de cobertura vegetal e uso de terra do Estado do Rio de Janeiro – Mapeamentos 2007 (ano base) e 2010, e alteração de mudanças entre as classes mapeadas

Classe	2007 área (%)	2010 área (%)	Alteração uso 2007-2010 (%)
Floresta Ombrófila Densa	28,25	28,19	-0,06
Restinga	3,11	3,11	-
Mangue	0,30	0,30	-
Vegetação úmida	0,42	0,43	0,01
Apicum	0,02	0,02	-
Campo de Altitude	0,05	0,05	-
Água	2,04	2,10	0,05
Reflorestamento	0,29	0,44	0,15
Pastagem	59,40	58,54	-0,86
Área Urbana Baixa Densidade	0,62	1,06	0,43
Área Urbana Média e Alta Densidade	4,05	4,07	0,03
Cultura Permanente	0,16	0,16	-
Solo Exposto	0,27	0,53	0,26
Afloramento Rochoso	0,49	0,49	-
Sombra	0,51	0,49	-0,01
Total	100	100	-

Fonte: INEA, 2010

De maneira mais específica, a Figura 17 apresenta o uso ocupação do solo para a região da bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas, na qual é possível identificar uma extensa área antrópica não agropastoril, que corresponde à ocupação urbana.

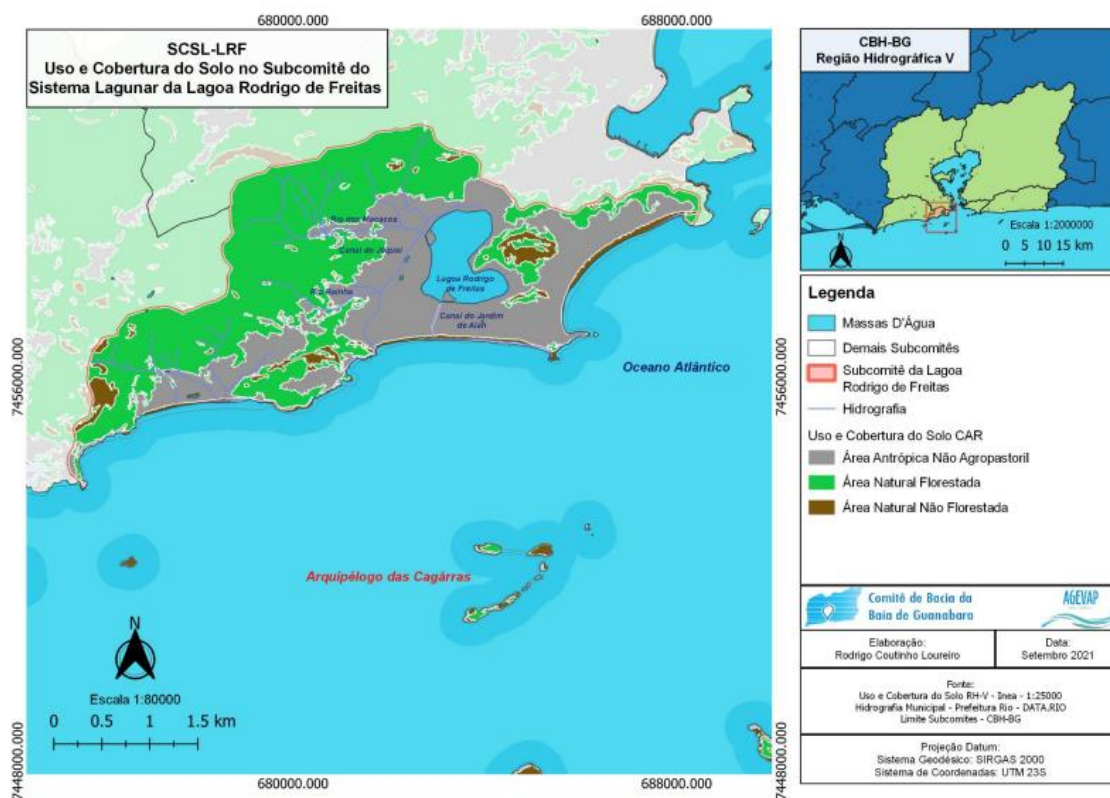


Figura 17 – Uso e cobertura do solo no Sistema Lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas

Fonte: Subcomitê do Sistema Lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas, 2022

3.2 Histórico de ocupação

O processo de ocupação da bacia do Rio dos Macacos evoluiu ao longo dos anos, passando por várias fases, em que o histórico dessa ocupação ajuda a entender o atual cenário da região. Porém, para um melhor entendimento das ocupações na Bacia estudada, é preciso um breve conceito sobre o processo de ocupação das cidades generalizado.

Em meados do século XIX, apenas 1% da população vivia nas cidades, e o efeito da revolução industrial provocou uma grande mudança favorecendo o aumento global da urbanização em ritmo acelerado, apresentado na Figura 18 (TUCCI et



al., 2003). Este processo de ocupação é dividido em três etapas, sendo elas: pré-industrial, industrial e comunicações.

Com uma ocupação dos centros urbanos de forma acelerada, as construções de edificações, calçadas, ruas, entre outros, substituíram a cobertura vegetal, tornando o solo impermeável e aumentando o volume superficial de água disponível para escoamento. Segundo Poli (2003), essas mudanças causaram, mais tarde, um grande infortúnio nas populações, gerando um aumento da temperatura nos centros urbanos e assim contribuindo para o aumento de chuvas, além de potencializar o escoamento superficial pelo processo de impermeabilização do solo. Logo, enxurradas e inundações se tornaram cada vez mais frequentes nesses centros.

Vale destacar que o arranjo de uma bacia hidrográfica natural, prévio ao processo desordenado de ocupação, é equilibrado e harmônico (MIGUEZ *et al.*, 2012). Em geral, o processo de ocupação começa pelas áreas mais planas, próximas aos corpos hídricos, e mais susceptíveis a inundação, e então seu crescimento vai em direção às encostas, mais susceptíveis a enxurradas.

Além disso, a geração de resíduos sólidos e conseqüentemente a poluição de rios e lençol freático, causa muitos problemas ambientais e de contaminações. Desta forma, a ocupação desenfreada, somada às condições topográficas do município do Rio de Janeiro, promoveram o agravamento de ocorrência de inundações, gerando altos danos à população e ao meio ambiente.

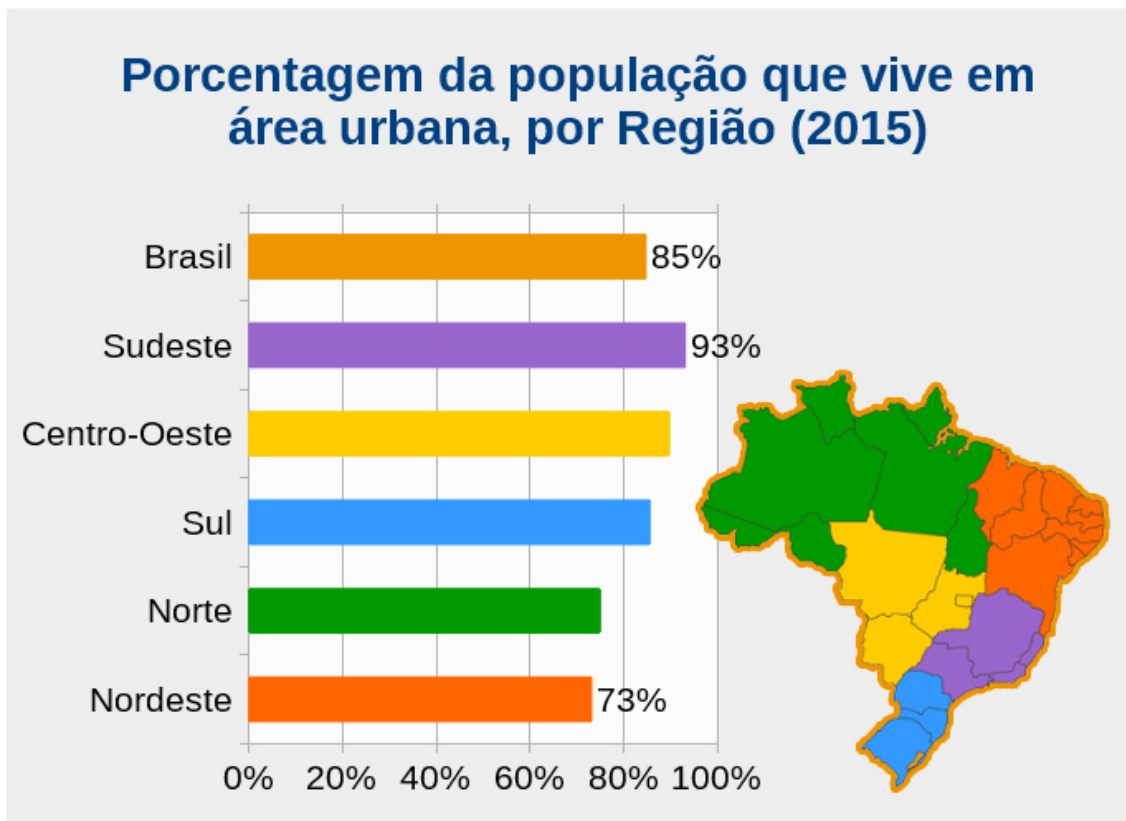


Figura 18 – Porcentagem da população que vive em área urbana por região
 Fonte: IBGE, Pesquisa nacional por amostra de Domicílios (PNAD), 2015

Já o processo de ocupação da Bacia do Rio dos Macacos se deu início no século XVI, em que o governador Cristóvão de Barros funda o Engenho d'El Rey, local onde hoje é encontrado o Jardim Botânico. O Engenho estava localizado perto da Lagoa Rodrigo de Freitas, anteriormente chamada pelo nome indígena "Çapôpenypau " que significa "Lagoa das Raízes"(MIGUEZ *et al.*, 2012). No século XVII, a região foi dividida em dois engenhos, o Nossa Senhora da Cabeça e o de Nossa Senhora da Conceição da Lagoa. Já em 1611, Sebastião Fagundes passou para o seu genro e capitão do exército, Rodrigo de Freitas Mello e Castro, a na época chamada Lagoa do Fagundes em que rebatizou para o nome usado até os dias atuais, Lagoa Rodrigo de Freitas, tendo a posse das terras até o início do século XIX. Durante mais de dois séculos, a propriedade pertenceu aos herdeiros de Rodrigo de Freitas, ilustrado na Figura 19.



Figura 19 - Lagoa Rodrigo de Freitas, 1822 (Henry Chamberlain)
Fonte: Enciclopédia Itaú Cultural

Com a chegada da Família real, no início do século XIX, foram implantadas a Fábrica Real de Pólvora, na Lagoa Rodrigo de Freitas, e o Horto Imperial, no Jardim Botânico. A partir da segunda metade do século XIX, a produção da cana-de-açúcar entrou em declínio, levando diversos engenhos parar suas atividades, além das algumas fazendas se subdividirem em algumas chácaras. A chegada do bonde no final do século XIX trouxe uma valorização dessas chácaras, e ainda nesta época, indústrias têxteis começaram a se instalar pela região que hoje estão os bairros da Gávea e Jardim Botânico, fazendo com que a região se tornasse um forte setor comercial da cidade neste período (Instituto Pereira Passos, 2003).

No início do século XX, o prefeito Pereira Passos inicia um processo de reforma urbana que inclui o saneamento da Lagoa Rodrigo de Freitas. Este projeto de saneamento se deu continuidade na posse do prefeito Carlos Sampaio, na década de 1920, em que a obra foi executada pelo sanitarista Saturnino de Brito, trazendo outras mudanças como o aterramento da Lagoa, alterando parte de sua fisionomia. A Avenida Epiácio Pessoa é inaugurada e o canal de escoamento



do Jardim de Alá e o canal da Avenida visconde de Albuquerque, Leblon, são regularizados (Dowsley, 2021). A Figura 20 ilustra a inauguração do Jockey Club Brasileiro, um dos pontos turísticos da cidade.



Figura 20 - Inauguração Jockey Clube Brasileiro em 1926
Fonte: JB em folhas, 2021

Na década de 1940 as fábricas têxteis foram desligadas, acabando com a fase industrial do bairro do Jardim Botânico. Visto que áreas da região estavam disponíveis, combinadas às chácaras do início do século XX, o bairro passou por um processo de ocupação, em que núcleos residenciais começaram a circundar a Lagoa Rodrigo de Freitas, principalmente a orla do Jardim Botânico. A expansão do Jardim Botânico foi possível após os aterramentos realizados na direção do Vale do Macaco e do Talude do Corcovado. Os primeiros residentes eram compostos por classes econômicas mais altas da sociedade, resultando em muitas casas e apartamentos luxuosos pela região. Porém, havia também ocupações irregulares, que posteriormente foram removidas pelo governador Carlos Lacerda, para a inauguração do Túnel Rebouças, em 1967. O túnel é de extrema importância para da cidade do Rio de Janeiro até os dias atuais, sendo responsável por ligar as zonas norte e sul do estado, com um tráfego de mais de



200 mil veículos por dia. Em 1975, o prefeito Marcos Tamoyo decretou a proibição de qualquer alteração no espelho d'água, além disso, estabeleceu o alinhamento das margens e sua utilização para fins recreativos. Nesta época houve o processo de remoção da favela da Catacumba, conforme a Figura 21, que residia cerca de 10 mil moradores, para a inauguração do parque da Catacumba. Essa remoção da favela atendia aos princípios orientados por Carlos Lacerda: Retirar favelas para embelezar a cidade e aproveitar áreas desocupadas para a criação de novos empreendimentos (RODRIGUES, 2012).



Figura 21 - Favela da Catacumba
Fonte: RODRIGUES (2013, p.13)

Segundo dados do Instituto Pereira Passos (Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2002), de acordo com a Figura 22, as favelas da zona sul da continuaram se expandindo na década de 90. No caso da Lagoa, a taxa de crescimento (2,71% ao ano) foi superior à média da cidade (2,40%). Em média, a população dos setores subnormais que estão na zona sul cresceu quase 2% ao ano, enquanto a população dos setores normais diminuiu cerca de 0,6% ao ano. De acordo com dados mais recentes, tem-se observado um aumento na

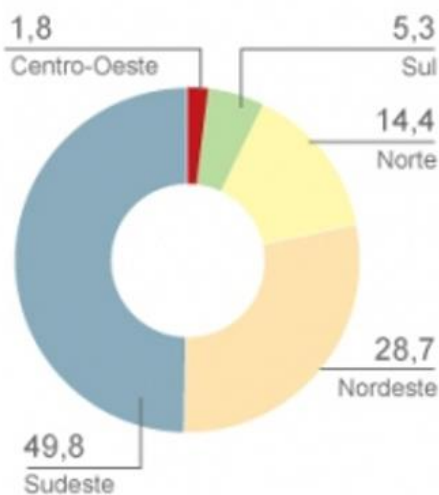


ocupação das favelas no Brasil nos últimos anos. Essa tendência pode ser atribuída a diversos fatores, tais como: desigualdade socioeconômica, falta de políticas habitacionais adequadas, crescimento desordenado das cidades, ausência de infraestrutura básica nas áreas periféricas, dificuldade de acesso a crédito imobiliário formal, entre outros. Esses elementos combinados têm impulsionado a expansão das favelas como uma resposta às demandas habitacionais de uma parcela da população com menor poder aquisitivo.

Favelização no Brasil

11,4 milhões de pessoas vivem em 6.329 favelas espalhadas pelo país

■ Por região – em %



■ As cinco metrópoles com o maior número de aglomerados urbanos irregulares



Figura 22 – Favelização no Brasil

Fonte: IBGE, 2010

3.3 Eventos pluviométricos extremos

De acordo com Freitas (2022), as enchentes no Jardim Botânico são um problema antigo, que ocorrem desde antes da fundação do bairro. Segundo dados do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2022), as enchentes na região



têm ocorrido com frequência nas últimas décadas. Nos últimos anos, o problema tem se agravado, devido ao crescimento urbano desordenado e à falta de investimentos em infraestrutura para prevenção e controle de enchentes.

De acordo com dados históricos, as primeiras enchentes no bairro Jardim Botânico datam do final do século XIX, quando a urbanização começou a se expandir na região. Em 1879, as inundações no Jardim Botânico foram relatadas como um problema sério, com águas que invadiram as casas e as ruas da região. Esse foi apenas o começo de uma série de eventos de inundação que se intensificariam nas décadas seguintes (DERECZYNSKI, 2017).

No início do século XX, a construção de barragens e canais para controle de inundações começou a ser uma prática comum em várias cidades do mundo. No entanto, no bairro Jardim Botânico, essas medidas só foram tomadas a partir da década de 1930, quando o governo iniciou a construção do sistema de esgotos da cidade. Esse sistema incluía canais para drenagem de águas pluviais e aterros para criar áreas de proteção contra enchentes (SILVA, 2005).

Embora essas medidas tenham sido importantes para minimizar os impactos das enchentes no bairro, elas não foram suficientes para eliminar completamente o problema. Nas décadas seguintes, várias outras enchentes foram registradas, com destaque para o evento de 1966, ilustrada na Figura 23, que inundou as ruas e casas do bairro Jardim Botânico, com 117 mortos e deixando centenas de pessoas desabrigadas (DERECZYNSKI, 2017).

Nos anos 1970, o governo iniciou um grande projeto para o controle de inundações na cidade do Rio de Janeiro. Esse projeto envolveu a construção de novos canais de drenagem, a ampliação de barragens e a implementação de sistemas de alerta e prevenção de enchentes. Essas medidas tiveram um impacto significativo na redução da frequência e da gravidade das enchentes no bairro Jardim Botânico.



Figura 23 - Capas dos Jornais: (A) “Última Hora” do dia 12/01/1966, (B) “Jornal do Brasil” do dia 22/02/1988 e (C) “O Globo” de 14/02/1996.

Fonte: DEREZYNSKI, 2002, p. 12.

No entanto, apesar de todas as medidas de prevenção e controle de inundações, ainda existem riscos associados às chuvas intensas na região. Em 2010, uma forte chuva atingiu o bairro Jardim Botânico, causando alagamentos e deslizamentos de terra em várias partes da região. O evento deixou muitas pessoas desabrigadas e causou danos significativos à infraestrutura local.

Desde então, o governo vem investindo em projetos de prevenção e gestão de riscos de desastres na região, incluindo a construção de novos canais de drenagem, a implantação de sistemas de alerta e prevenção de enchentes e a realização de obras de contenção de encostas. Essas medidas são essenciais para garantir a segurança e o bem-estar da população local e para proteger a economia da cidade contra os impactos negativos das enchentes.

A seguir, apresentaremos relatos de alguns dos desastres mais recentes ocorridos no bairro Jardim Botânico, incluindo aquele que é considerado o mais grave de sua história e que servirá como base de dados para a elaboração do modelo hidrodinâmico de cheias deste estudo. É importante ressaltar que a

retenção de água é mais significativa nas ruas Pacheco Leão, Jardim Botânico e Lopes Quintas, cuja localização pode ser vista na Figura 24.



Figura 24 - Localização das ruas Jardim Botânico, Lopes Quintas e Pacheco Leão

Fonte: TAKITA e CÂMARA, 2022, p. 37

3.3.1 Evento de 5 de abril de 2010

No dia 5 de abril de 2010, as chuvas começaram na madrugada e duraram todo o dia seguinte, impactando fortemente as cidades do Rio de Janeiro e Niterói. O Morro do Bumba em Niterói sofreu um deslizamento que resultou em 47 mortes e centenas de desabrigados. O bairro Jardim Botânico também foi afetado, como evidenciado pelas Figuras 25 e 26, e recebeu um total de 303 mm de chuva em 24 horas, conforme relatório do Alerta Rio.



Figura 25 - Rua Pacheco Leão (05/04/2010)
Fonte: Memória Globo.



Figura 26 - Margem da Lagoa Rodrigo de Freitas (05/04/2010)
Fonte: Memória Globo.

3.3.2 Evento de 20 de junho de 2017

Embora considerada uma das chuvas menos intensas do levantamento, a precipitação ocorrida em 20 de junho de 2017 causou alagamentos em várias ruas, conforme evidenciado na Figura 27, especialmente nos bairros da Zona Sul do Rio de Janeiro. De acordo com o Alerta Rio, a chuva de 2017 registrou um total de 188,6 mm em 24 horas no bairro do Jardim Botânico.



Figura 27 - Margem da Lagoa Rodrigo de Freitas (05/04/2010)
Fonte: G1.

3.3.3 Evento de 9 de abril de 2019

No dia 9 de abril de 2019, as fortes chuvas que atingiram o Rio de Janeiro quebraram recordes históricos em seis bairros, incluindo o Jardim Botânico, conforme demonstrado na Tabela 5 e ilustrado nas Figuras 28 e 29. O evento resultou na perda de 10 vidas, com 7 delas sendo na Zona Sul do Rio. De acordo com o Alerta Rio, o Jardim Botânico experimentou a maior quantidade de chuva em 22 anos, alcançando um registro de 334,4 mm em um período de 24 horas.

Tabela 5 - As dez maiores precipitações pluviométricas em 24 horas

As Dez maiores precipitações pluviométricas em 24 horas.				
ID	Estação	mm/24h	Data	Hora
103	Sumaré	360,2	06/04/2010	17:35
3	Rocinha	343,4	09/04/2019	15:00
28	Alto da Boa Vista	341,2	09/04/2019	16:15
17	Barra/Barrinha	335,2	09/04/2019	15:00
16	Jardim Botânico	334,4	09/04/2019	15:00
6	Copacabana	329,4	09/04/2019	15:30
1	Vidigal	312,2	09/04/2019	14:45
19	Barra/Riocentro	311,4	09/04/2019	15:00
20	Guaratiba	310,6	01/04/2022	20:55
18	Jacarepaguá/Cidade de Deus	289,6	09/04/2019	16:00

Fonte: Alerta Rio.



Figura 28 - Rua Jardim Botânico (09/04/2019)
Fonte: G1.



Figura 29 - Rua Pacheco Leão (09/04/2019)
Fonte: G1.

3.3.4 Evento de 1 de abril de 2022

Uma chuva recente afetou o bairro Jardim Botânico, conforme ilustrado na Figura 30, no primeiro dia de abril de 2022. De acordo com o sistema Alerta Rio, choveu 217,8 mm em 24 horas. O prefeito da época, Eduardo Paes, estimou que a água na rua Jardim Botânico tenha chegado a cerca de 1,1 metros de altura.



Figura 30 - Rua General Garzón (01/04/2022)
Fonte: G1.

3.3.5 Evento de 7 de fevereiro de 2023

Segundo informações divulgadas pela prefeitura do Rio de Janeiro, no dia 7 de fevereiro de 2023, a cidade foi classificada em estágio de alerta, ilustrado na Figura 31, devido ao registro de chuvas com volume superior a 25 milímetros (mm) na estação do Jardim Botânico (30,4mm). Houve o registro de pelo menos duas mortes.



Figura 31 - Rua Jardim Botânico (07/02/2023).
Fonte: G1

3.4 Sistema de drenagem da Bacia hidrográfica do Rio dos Macacos

Segundo Miguez *et al.* (2012), a bacia é de grande importância para a cidade já que sua localização é rica com diversos pontos turísticos como a Lagoa Rodrigo de Freitas, Vista Chinesa e praia do Leblon. Além disso, possui vias bastante movimentadas, com fluxo diário de aproximadamente 200 mil veículos. A Rua Jardim Botânico e a Avenida Borges de Medeiros são consideradas as de maior interesse da região, visto que ambas as vias dão acesso ao centro da cidade e à Barra da Tijuca, bairros de alto interesse econômico da cidade. A Figura 32 apresenta o trecho do Rio dos Macacos localizado no cruzamento das ruas Jardim Botânico e General Garzón.



Figura 32 - Canal do Rio dos Macacos no trecho do cruzamento entre a Rua Jardim Botânico e Rua General Garzon
Fonte: Autores



A bacia apresenta cerca de 9,07 km² de área de drenagem, declividade média de 0,05894 m/m e percentual de cobertura vegetal da ordem de 40 % (MIGUEZ *et al.*, 2012). Por estar próximas as suas encostas, e com transições bruscas para as áreas mais baixas, a região apresenta escoamentos velozes, que ao chegar nas regiões de planícies resultam em alagamentos provenientes da mudança de declividade. O Rio dos Macacos é o principal da bacia, com cerca de 4,46 km, apresentado na Figura 33. Sua nascente está localizada na região mais alta da sua encosta e seu exultório na Lagoa Rodrigo de Freitas. O rio recebe contribuições de vários córregos até chegar no seu ponto de saída, em que na margem esquerda tem as vertentes vindos do maciço da tijuca e o Rio Cabeça, que de acordo com Miguez *et al.* (2012) é o seu principal tributário, que aflui até o curso principal em confluência na Rua General Garzón.

Já na margem direita em condições de cheias, pode-se ocorrer a transposição entre os rios Rainha e dos Macacos, devido ao canal que chega pelo Jockey Clube Brasileiro, em que as duas bacias são ligadas por um fundo praticamente plano, podendo até desaguar na praia do Leblon a partir do canal da Rua Visconde de Albuquerque. O exultório da bacia está localizado na Lagoa Rodrigo de Freitas, junto ao Clube Naval Piraquê, através de um canal artificial que segue pela Rua General Garzón. Próximo a sua foz existe uma comporta, apresentado na Figura 34, que permanece fechada, e em condições de marés elevadas, esta pode ser submersa.

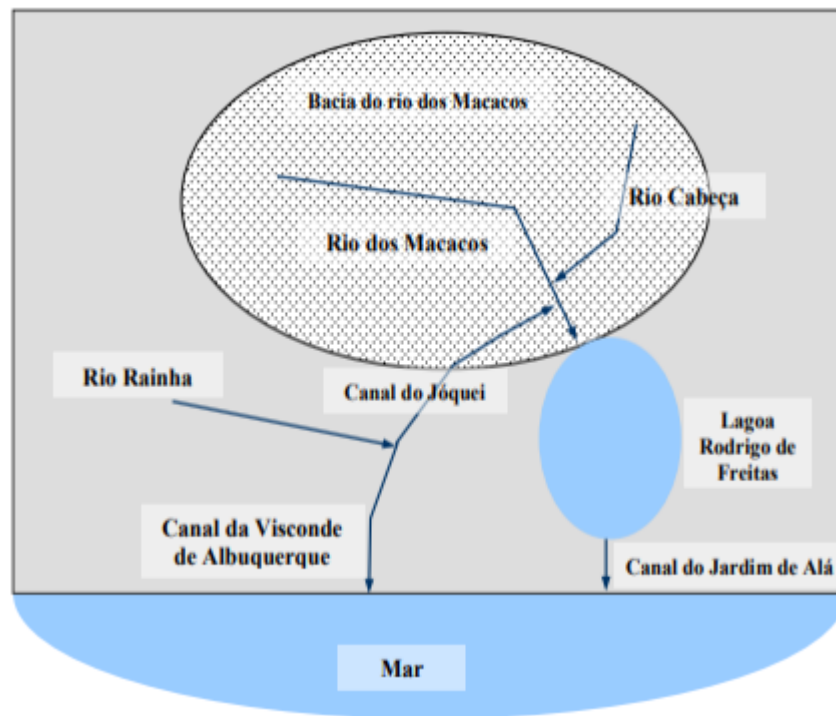


Figura 33 - Hidrografia da região estudada
Fonte: Miguez *et al.* (2012, p. 15)



Figura 34 – Foto da comporta da Rua General Garzón tirada no dia 02/06/2023
Fonte: Autores

A hidrografia da Bacia é composta por rios perenes que definem 7 sub-bacias de encosta, representados na Tabela 6. As demais sub-bacias de encostas apresentam rios que submergem apenas em períodos de cheias. Os rios Algodão e Cabeça, ilustrados na Figura 35, afluentes do Rio dos Macacos, estão localizados mais a leste da bacia, e não deságuam diretamente no Rio principal. Ao chegar em regiões mais baixas, eles escoam por galerias até os canais da Rua Batista da Costa e Avenida Lineu de Paula Machado, e assim chegando ao Rio dos Macacos. Em relação ao escoamento superficial, as sub-bacias do Riacho do Pai Ricardo e do Rio Cabeça são responsáveis pelas maiores áreas de drenagem entre as sub-bacias.



Figura 35 - Detalhe da foz do Rio dos Macacos, na Lagoa Rodrigo de Freitas.
 Fonte: Miguez *et al.* (2012, p. 10)

Tabela 6 - Caracterização das sub-bacias do rio dos Macacos.

Rio	Área (m ²)	Extensão (km)	Cotas de jusante e montante na extensão considerada (m)
dos Macacos (parte alta)	979.883	1,64	100 a 500
do Pai Ricardo	1.400.900	1,55	100 a 525
Xaxim	302.765	1,10	65 a 400
Ouriço	502.399	1,60	60 a 535
Sete Quedas	828.358	1,54	55 a 500
Algodão	647.174	1,00	65 a 470
Cabeça	1.438.490	1,52	55 a 430
do Grotão	496.863	1,42	25 a 230

Fonte: Miguez *et al.* (2012, p. 10)



O trecho onde está localizado o Rio dos Macacos, possui um canal com uma geometria variável, com um fundo pedregoso e margens que podem ser encontradas com vegetação ou com paredes de concreto e alvenaria que fazem parte dos muros de construções próximas. Essa tipologia de canal continua até o começo do Jardim Botânico, próximo à Aleia Frei Veloso, onde sua geometria é retangular, e o fundo e as paredes são compostos de pedras argamassadas. Nesse trecho, é possível notar a presença de degraus ao longo do canal e pequenas bacias de amortecimento, que visam diminuir a velocidade do escoamento das águas.

No Jardim Botânico, o canal é superficial e tem profundidade média de 1,5 m. Ele tem formato retangular com paredes em concreto, sua largura varia entre 3,8 m e 5,0 m, e sua declividade média é de 0,0062 m/m. Além disso, há um canal de derivação para parte do fluxo de água, que cruza o Jardim Botânico e deságua no canal do Jockey. Ao se aproximar da interseção entre a Rua Pacheco Leão e a Rua Jardim Botânico, o rio passa a ser direcionado para uma galeria subterrânea até se encontrar com o canal a céu aberto na Rua General Garzon. Esse trecho do canal é de seção trapezoidal, com base de 4,0 m e profundidade de 2,5 m. Ele é afetado pelo nível da Lagoa Rodrigo de Freitas e recebe contribuições do canal da Av. Lineu de Paula Machado e do canal do Jockey Club.

A realização de intervenções no bairro do Jardim Botânico, com o objetivo de solucionar as falhas no sistema de drenagem local, tem sido frequente. Entretanto, apesar dos esforços empreendidos, não têm sido obtidos resultados satisfatórios, uma vez que as falhas persistem. Cabe ressaltar que um sistema de drenagem ineficiente pode acarretar diversos problemas, tais como enchentes, alagamentos e danos à infraestrutura urbana. Existem dados recentes que podem auxiliar a compreensão das dificuldades enfrentadas na região.



No dia 19 de novembro de 2019, a prefeitura do Rio firmou um contrato com o intuito de eliminar pontos críticos de drenagem no bairro Jardim Botânico. As obras consistiam em restaurar a galeria de drenagem na Rua Jardim Botânico, feitas entre a Rua Pacheco Leão e a Praça Santos Dumont. De acordo com a publicação do Diário oficial da Prefeitura do Rio de Janeiro, no dia 8 de julho de 2020 a obra denominada "Eliminação de pontos críticos de drenagem no Jardim Botânico" apareceu como executada, porém, mesmo com as intervenções, no dia 22 de setembro de 2020 a Rua Jardim Botânico voltou a alagar, conforme evidenciado na Figura 36.

Prefeitura pagou R\$ 2,2 milhões por obra de drenagem na Rua Jardim Botânico, que voltou a alagar nesta terça

Prefeitura diz que obra está 50% concluída e que alagamento desta terça tem como causa a ressaca que elevou o nível do mar e atrapalhou o sistema de drenagem.

Figura 36 - Matéria sobre Rua Jardim Botânico após obras de restauração da galeria.
Fonte: G1

Por meio de nota, a Secretaria Municipal de Infraestrutura, Habitação e Conservação, órgão responsável pelo contrato, afirmou que o motivo do alagamento está relacionado com a ressaca que elevou o nível do mar, impedindo que o sistema de drenagem no entrono da Lagoa Rodrigo de Freitas desaguasse no Canal do Jardim de Alah.



4 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentam-se as fases essenciais para modelar as opções de mitigação das inundações na bacia hidrográfica do Rio dos Macacos, desde a coleta de informações, criação do modelo hidrodinâmico para enchentes até a simulação das opções desenvolvidas.

4.1. Estudos de Chuvas Intensas

Preliminarmente o método utilizado para determinação da curva e equação intensidade-duração-frequência (IDF) é a distribuição de Gumbel, que por sua vez estima as precipitações máximas/intensidades pluviométricas de acordo com um tempo de recorrência e uma duração de chuva específica.

Para a construção da equação IDF foram analisados os dados pluviométricos dos postos da Rocinha e Jardim Botânico inseridos na área de estudo. O posto da Rocinha está localizado na Estrada da Gávea, número 242, possui 25 anos de dados pluviométricos de 15 em 15 minutos entre o período de 1997 até o período de 2022. Já posto Jardim Botânico, está localizado no Jockey Club Brasileiro, na Rua Jardim Botânico, número 1003, e é uma estação remota que realiza a leitura e transmissão automáticas de dados. Este posto possui 25 anos com dados pluviométricos de 15 em 15 minutos entre o período de 1997 até o período de 2022. Devido a quantidade de dados disponíveis e por se tratar de informações recentes que representam o regime pluviométrico local com maior precisão, optou-se por utilizar a distribuição de Gumbel para encontrar novas equações IDF intensidade-duração-frequência (IDF) ao invés de utilizar equações disponíveis em fontes oficiais, como as disponíveis no site da Fundação Rio-Águas.

As equações construídas para o estudo de chuvas intensas podem ser apreciadas na equação 2 para a Rocinha e na equação 3 para o Jardim Botânico.



$$i = \frac{5.196,73 \cdot TR^{0,0561}}{(t + 24,7)^{1,004677}} \quad \text{Equação 2}$$

$$i = \frac{5.798,91 \cdot TR^{0,0628}}{(t + 27,4)^{0,995861}} \quad \text{Equação 3}$$

Após a definição dos parâmetros da equação IDF, foram calculadas as chuvas de projeto considerando o TR de 25 anos, relativo ao dimensionamento e verificação do sistema de macrodrenagem, e a duração da chuva de 70 minutos que corresponde ao tempo de concentração da Bacia do Rio dos Macacos (MIGUEZ *et al.*, 2012). A consideração da duração da chuva igual ao tempo de concentração consiste em uma premissa que garante uma maior contribuição dos escoamentos superficiais nas proximidades do exultório da Bacia hidrográfica se tratando então de uma situação a favor da segurança.

O hietograma da chuva de projeto com TR de 25 anos e tempo de duração de 75 minutos, pode ser visto nas figuras 37 e 38.

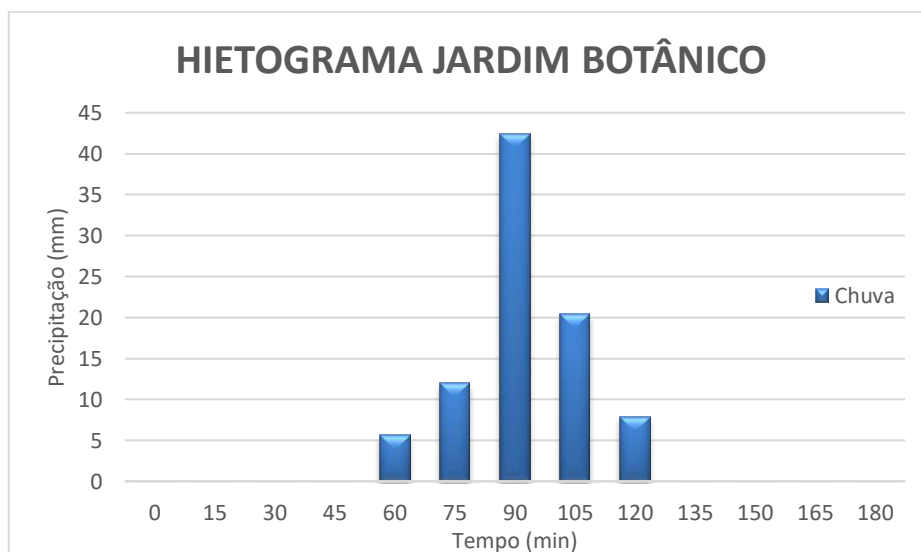


Figura 37 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 25 anos no Bairro Jardim Botânico.
Fonte: Autores

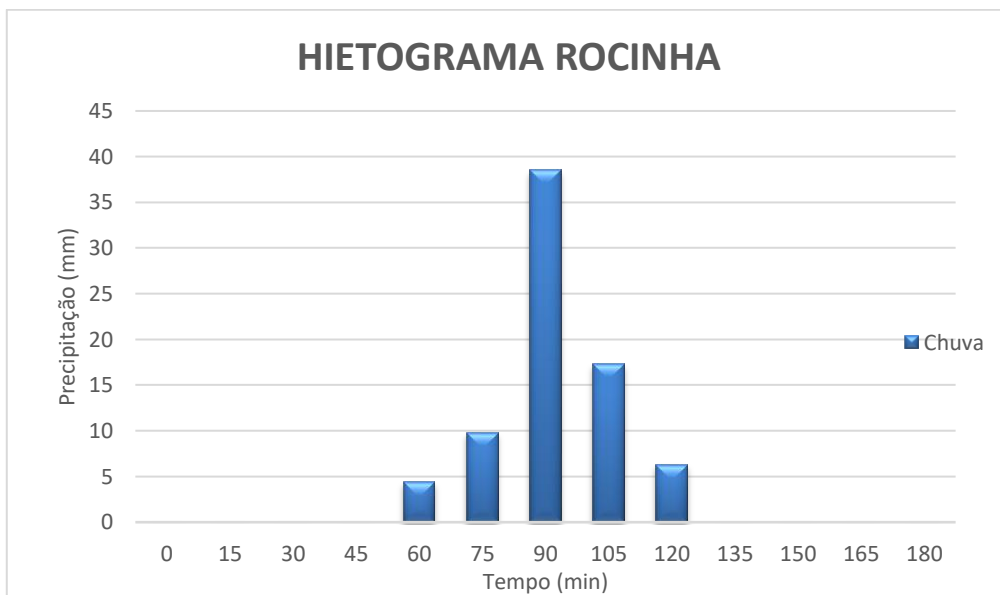


Figura 38 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 25 anos no Bairro Rocinha.

Fonte: Autores

Adicionalmente, para realizar o processo de calibração do modelo hidrodinâmico, foi necessário realizar uma busca de informações do histórico de chuvas do bairro Jardim Botânico no banco de dados do site "Alerta Rio". Conforme já mencionado neste trabalho, a chuva registrada em 2019 estabeleceu um recorde histórico, e portanto, suas informações de precipitação foram utilizadas para simular o mesmo evento no software MODCEL, que veremos ainda neste capítulo. A figura 39 apresenta as chuvas utilizadas para simulação do evento, obtidas no site "Alerta Rio".

Segundo o estudo realizado por Takita e Câmara (2022), analisando as diferentes durações de chuva, foi possível determinar os tempos de recorrência para o evento em questão:

- 15 minutos: TR 2,6 anos;
- 30 minutos: TR 6,5 anos;
- 45 minutos: TR 20,1 anos;
- 60 minutos: TR 53,9 anos;
- 75 minutos: TR 128,8 anos.



Considerando o tempo de concentração de 70 minutos já estabelecidos anteriormente, a chuva crítica para a bacia teve o tempo de retorno de quase 130 anos, para o qual não foi projetado o sistema de macrodrenagem.

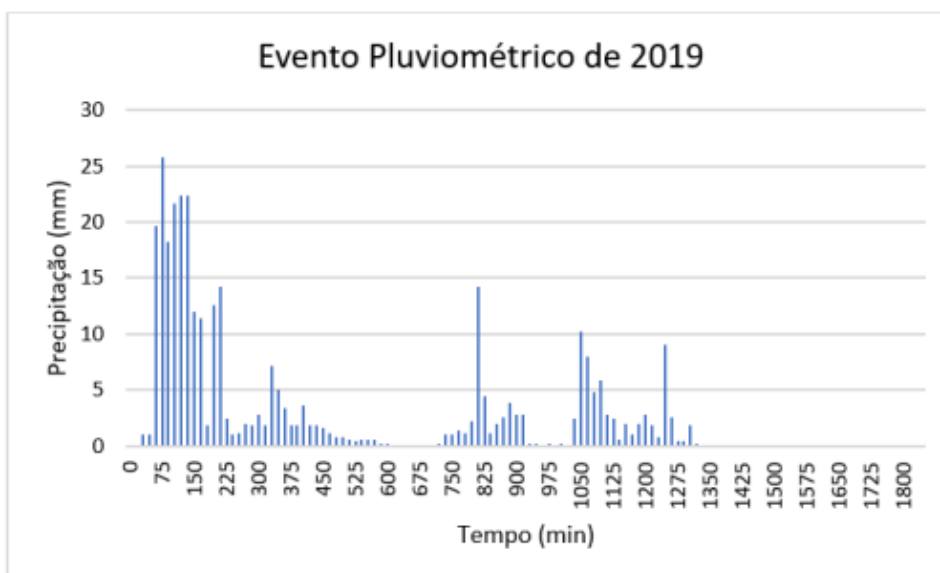


Figura 39 - Hietograma do evento de 2019
 Fonte: TAKITA e CÂMARA, 2023, p.57.

4.2. Construção do Modelo hidrodinâmico de cheias urbanas

São conduzidas análises das inundações em duas etapas a partir dos estudos hidrológicos da bacia do Rio dos Macacos. Primeiro passo parte da utilização do Sistema de Informação Geográfica QGIS. Esta etapa constituiu na determinação de características territoriais que afetem o ciclo hidrológico e o comportamento hidrodinâmico da bacia. Além disso, o software é utilizado no aprimoramento da base de dados elaborada para representação da bacia em modelo matemático. A segunda etapa parte da utilização do modelo hidrológico-hidrodinâmico intitulado Modelo de Células de Escoamento (MODCEL). Esta etapa consistiu na



simulação da resposta da bacia hidrográfica para os eventos pluviométricos em questão.

4.2.1. Sistema de Informação Geográfica

O *Quantum Geographic Information System* (QGIS) é um software livre e de código aberto para a análise, visualização e edição de dados geoespaciais. Ele foi criado em 2002 e oferece várias funções úteis, como desenhar mapas de elevação, interpolação de dados, gerar curvas de nível e criar contornos de terreno que podem ser vistos na tela. Além disso, o QGIS permite a importação e exportação de diversos tipos de dados geoespaciais e pode ser integrado a outras ferramentas e softwares de geoprocessamento. Ele é utilizado em diversas áreas, como planejamento urbano, gestão ambiental, agricultura, energia, entre outras. Por ser um software livre, o QGIS tem uma comunidade ativa de usuários e desenvolvedores em todo o mundo, o que contribui para a constante melhoria e atualização do software (WING et al., 2003).

Noutro, a análise de dados geográficos era realizada por meio de gráficos desenhados à mão, o que dificultava o processamento contínuo de dados e desenhos e encarecia o trabalho. Na segunda metade do século XX, com o avanço da tecnologia computacional, foram criados os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ou Geografia de Sistema de Informação (GIS), que permitem a expressão de elementos geográficos em ambientes computacionais, proporcionando melhor integração e acompanhamento do desenvolvimento de projetos de engenharia (LEE et al., 2009).

O software QGIS é um exemplo de software GIS distribuído gratuitamente sob a licença de código aberto. Com o QGIS, é possível gerenciar dados geográficos, visualizá-los na forma de mapas interativos ou planilhas de dados, e modificá-los, alterando geometrias, sistemas de projeção ou salvando-os em outro formato. Além disso, o QGIS é capaz de ler e editar dados vetoriais e raster de diferentes formatos ou dados de planilhas (WING et al., 2003).



O QGIS é uma ferramenta útil e versátil para a análise de dados geográficos. Além de ser gratuito, ele permite a manipulação de dados de diferentes formatos, tornando-se uma ferramenta importante para profissionais de diversas áreas, como engenharia, geografia e meio ambiente. Com suas capacidades de visualização e modificação de dados, o QGIS é uma ferramenta importante para tomada de decisões e planejamento de projetos. (FRIEDRICH, 2014).

4.2.2. Simulação Hidrológica-Hidrodinâmica de Cheias Urbanas

O MODCEL é um modelo hidráulico Quasi-2D criado por Miguez em 2001, que permite a simulação do escoamento de uma onda de cheia ao longo de um rio, incluindo suas planícies de inundação e/ou áreas urbanas, por meio de uma rede de conexões unidimensionais. De acordo com Oliveira (2018), o MODCEL é capaz de representar estruturas hidráulicas e paisagens naturais ou urbanas, e as células do modelo são conectadas por relações hidráulicas que permitem a troca de vazões entre elas. As ligações mais comuns entre as células incluem canais, planícies, vertedouros, orifícios, galerias, bueiros, bombas, comportas e equações de cota e descarga.

A inspiração para a criação do MODCEL remonta à década de 60, quando o primeiro modelo matemático bidimensional significativo, que divide o espaço em células, foi desenvolvido pela Société Grenobloise d'Etudes et Applications Hydrauliques (SOGREAH), a pedido da UNESCO, para estudar as inundações que afetam o delta do rio Mekong. Essas enchentes atingem uma área habitada por cerca de dez milhões de pessoas no Camboja e no Vietnã (Miguez, 2001). O MODCEL tem sido amplamente utilizado em estudos hidrológicos e ambientais, permitindo a simulação de eventos de cheias e enchentes e a avaliação de medidas de controle de inundações.

O MODCEL é um software que pode ser usado gratuitamente em estudos hidrológicos e ambientais. Além disso, é um modelo hidráulico relativamente fácil de usar e que produz resultados precisos. Sua capacidade de simular o



escoamento de cheias ao longo de um rio, planícies de inundação e áreas urbanas o torna uma ferramenta valiosa para o planejamento e a gestão de recursos hídricos, permitindo a avaliação de medidas de controle de inundações e a previsão de enchentes em diferentes cenários. Com base nos resultados obtidos por meio do MODCEL, os planejadores podem tomar decisões mais informadas e embasadas em relação à gestão de recursos hídricos em suas regiões.

Segundo Miguez *et al.* (2012), a região da bacia hidrográfica do Rio dos Macacos é caracterizada pela presença de uma complexa rede de escoamento, que mistura segmentos de canal natural e artificial com galerias de drenagem. Nas áreas mais baixas e planas da bacia, há várias áreas que permitem a retenção temporária de água e o fluxo superficial, formando redes secundárias que complementam o sistema de drenagem principal. Além disso, a transposição de parte da vazão entre os rios dos Macacos e Rainha por meio do Canal do Jóquei e a influência das marés na foz do sistema na Lagoa Rodrigo de Freitas contribuem para a complexidade do funcionamento da rede de drenagem. Nesse contexto, a ferramenta de modelagem MODCEL foi escolhida para auxiliar no diagnóstico de cheias.

4.3. Antecedentes da Base de Simulação

A partir de um modelo da divisão da Bacia do Rio dos Macacos em células desenvolvidas por Miguez *et al.* (2012) e complementada por Takita e Câmara (2023), foram desenvolvidas uma série de análises e complementações na base de simulação, a fim de obter-se um modelo que representasse o mais próximo possível a realidade do sistema de macrodrenagem da bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas.

A Figura 40 apresenta a divisão de células elaborada por Miguez *et al.* (2012), na qual é possível observar que o modelo se limitou à representação da bacia do Rio dos Macacos.

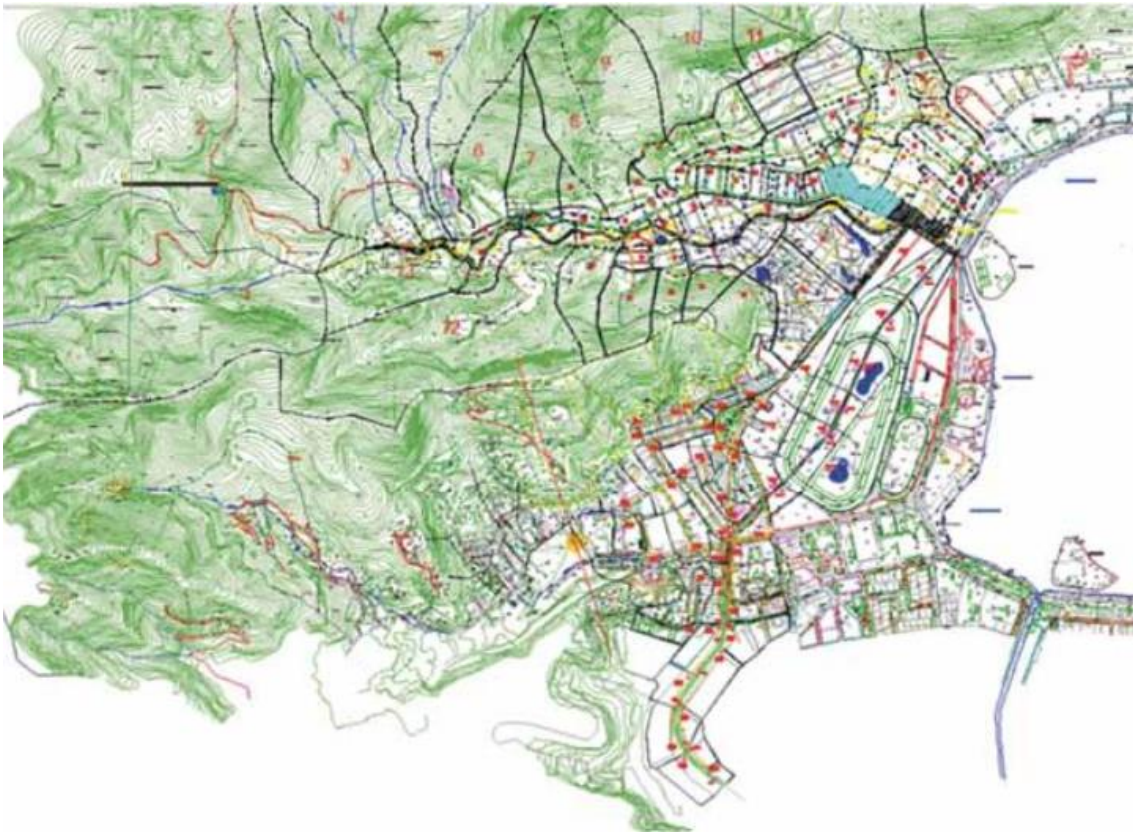


Figura 40 – Divisão original da bacia do Rio dos Macacos em células.
Fonte: Miguez *et al.* (2012)

Na Figura 41 é possível ver a inserção das células de escoamento iniciais com a complementação para representação da bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas, praia de Ipanema e praia do Leblon.



Figura 41 – Divisão de células de escoamento.
Fonte: TAKITA e CÂMARA (2023).

Resumidamente, no âmbito do trabalho de Takita e Câmara (2023) a complementação do modelo partiu da verificação dos valores dos coeficientes de RunOff (porcentagem de água que se torna escoamento superficial) na tabela de atributos. Os seguintes valores de RunOff foram considerados para a região de interesse de acordo com o manual de “INSTRUÇÕES TÉCNICAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS E DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA” fornecido pela Fundação Rio-Águas:

- 0,30 - Áreas com muita vegetação;
- 0,45 - Áreas edificadas contendo mais de 70% de vegetação;
- 0,70 - Áreas edificadas contendo aproximadamente 50% de vegetação;
- 0,75 - Áreas edificadas contendo aproximadamente 30% de vegetação;



- 0,85 - Áreas edificadas contendo menos de 10% de vegetação;
- 0,90 – Ruas e calçadas;
- 1,00 – Corpo hídrico.

Cada célula foi classificada de acordo com seu tipo de ocupação da região a ser representada. As classificações ficaram divididas em:

- Tipo 0 – Rios, canais e lagoa;
- Tipo 2 - Região urbana;
- Tipo 4 - Região não ocupada ou encosta.

Com base na precisão da representação do território, foi viável estimar que as células urbanas têm uma área total equivalente à área em que o armazenamento de água é efetivamente realizado. Consequentemente, para o Tipo 0 e o Tipo 2, foi levado em conta que a área total das células possuía o mesmo valor da área de armazenamento. Vale destacar que o Tipo 2 já representa a região urbana de maneira escalonada, podendo acumular água em uma parcela que representa as ruas, outra as calçadas, e outra as edificações, além dos espaços livres.

Para o Tipo 4, de áreas de montante, foi considerado inicialmente que a área de armazenamento das células corresponderia a 10% da sua área total. A simplificação foi possível devido à representação limitada das células das regiões não ocupadas, que são responsáveis por representar a contribuição de vazões para as áreas mais baixas e não a representação precisa dos níveis de inundação. O uso do multiplicador como parâmetro de calibração pode impactar as vazões de pico que são drenadas para áreas mais baixas.

Para a obtenção dos valores de cota de fundo e cota inicial de cada célula, foi necessário analisar o Modelo Digital do Terreno (MDT) com a inserção de um arquivo raster, apresentado na Figura 42, em que as diferenças de níveis altimétricos são diferenciadas pela escala de cor, em que quanto mais escuro for mais baixa será a região, ou seja, mais próxima estará do nível do mar.

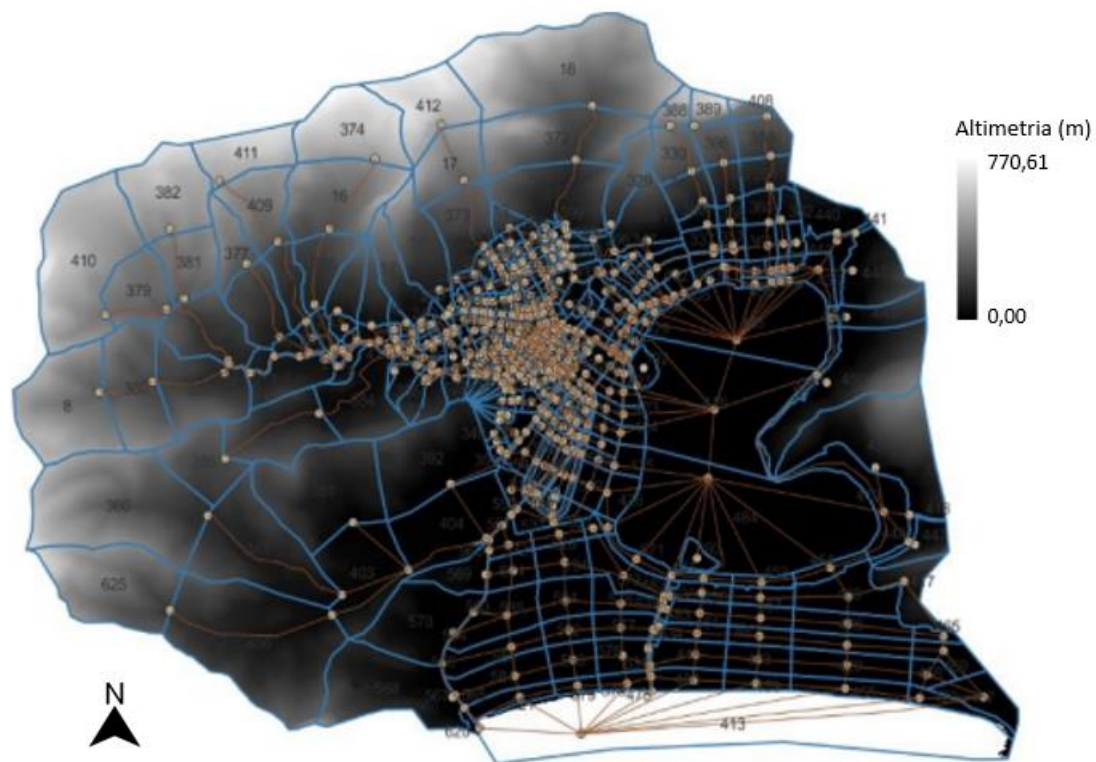


Figura 42 - Escala de cor do Raster.
Fonte: Adaptado de Takita e Câmara (2023)

Os dados referentes ao coeficiente de rugosidade (ou coeficiente de Manning) das conexões utilizados por Takita e Câmara (2023), foram adquiridos a partir de tabelas também fornecidas pela Fundação Rio-Águas.

Os resultados encontrados na simulação feita por Takita e Câmara (2023) para o cenário de calibração, levando em conta o evento pluviométrico intenso de 2019, apresentaram algumas inconsistências em relação ao acúmulo de água em determinadas regiões, conforme pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre lâminas observadas e lâminas simuladas.

Região	Local	Lâmina d'água observada (m)	Lâmina d'água simulada (m)
I	Gávea	0,90	1,16
II	Horto	0,30	0,51



III	Rua Jardim Botânico (Pacheco Leão)	1,50	1,80
IV	Lagoa (Jóquei)	0,50	1,05
V	Rua Jardim Botânico (Parque Lage)	1,00	0,96

Fonte: TAKITA e CÂMARA, 2023, p.64.

Ao observar a tabela, pode-se identificar uma diferença significativa na maioria dos valores. A maior discrepância foi encontrada na região da Lagoa, onde a taxa de erro foi de cerca de 108%. Isso indica que o programa calculou uma lâmina de água muito maior do que a esperada. Por conta disso, o presente trabalho necessitou complementar o processo de calibração do modelo para deixar os resultados mais próximos aos reais. Além disso, algumas das alturas de lâminas d'água que foram estimadas pelas imagens, podem apresentar um percentual de erro maior quando simulado, visto que as imagens podem não coincidir com o pico das cheias. Por exemplo, na região do Horto as imagens encontradas foram registradas após o pico, e com isso o valor da lâmina d'água possivelmente foi maior que a estimada.

Como visto na tabela, foram definidas 5 regiões com foco no acúmulo de água. A Região I corresponde ao bairro da Gávea, a Região II na comunidade do Horto, a Região III na Rua Jardim Botânico na altura da Rua Pacheco Leão, a Região IV na Lagoa Rodrigo de Freitas na altura do Jóquei e a Região V na Rua Jardim Botânico na altura do Parque Lage. As Tabelas 8, 9, 10 e 11 apresentam algumas imagens da inundação ocorrida em 2019 serviram como base para estimar a altura da lâmina d'água real.

Tabela 8 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos em abril de 2019 na Gávea. Fonte: Indicadas na tabela

		<p>Inundação em frente ao Shopping da Gávea Fonte: Twitter</p>
<p>REGIÃO I (GÁVEA)</p>		<p>Inundação em frente ao Shopping da Gávea Fonte: Twitter</p>
		<p>Inundação em frente ao Hospital Miguel Couto Fonte: G1</p>

Tabela 9 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos em abril de 2019 no Horto. Fonte: Indicadas na tabela

		<p>Água invadindo casa de morador da Comunidade do Horto</p> <p>Fonte: Frame da reportagem da emissora TV Globo</p>
<p>REGIÃO II (HORTO)</p>		<p>Água invadindo casa de morador da Comunidade do Horto</p> <p>Fonte: Frame da reportagem da emissora TV Globo</p>

Tabela 10 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos em abril de 2019 no Jardim Botânico. Fonte: Indicadas na tabela





<p>REGIÃO III (JARDIM BOTÂNICO ALTURA DA RUA PACHECO LEÃO)</p>		<p>Nível de água na altura do peito de um homem na Rua Jardim Botânico</p> <p>Fonte: O Globo</p>
		<p>Água quase encobrendo carros na Rua Jardim Botânico</p> <p>Fonte: G1</p>

Tabela 11 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos em abril de 2019 na Lagoa Rodrigo de Freitas. Fonte: Indicadas na tabela

<p>REGIÃO IV (LAGOA RODRIGO DE FREITAS NA ALTURA DO JOQUEI)</p>		<p>Inundação na Lagoa Rodrigo de Freitas em frente ao Jóquei</p> <p>Fonte: O Globo.</p>
<p>REGIÃO IV (LAGOA RODRIGO DE FREITAS NA ALTURA DO JOQUEI)</p>		<p>Rua Jardim Botânico na altura do Parque Lage</p> <p>Fonte: G1.</p>

4.4. Complementação e Calibração da Base de Simulação

A seguir, são apresentados os processos de complementação da base hidrodinâmica para melhor representar os escoamentos do sistema de macrodrenagem da Lagoa Rodrigo de Freitas.

4.4.1. Complementação do cadastro do sistema de macrodrenagem

Foram analisadas as seções transversais dos canais da região, conforme ilustrados nas Figuras 43 e 44, disponibilizados pelo banco de dados da Fundação Rio-Águas. Com base nesses dados, foi possível obter informações relevantes sobre as características hidráulicas locais, tais como as cotas de fundo das margens e dos canais, bem como a largura média de passagem de água pelos canais.

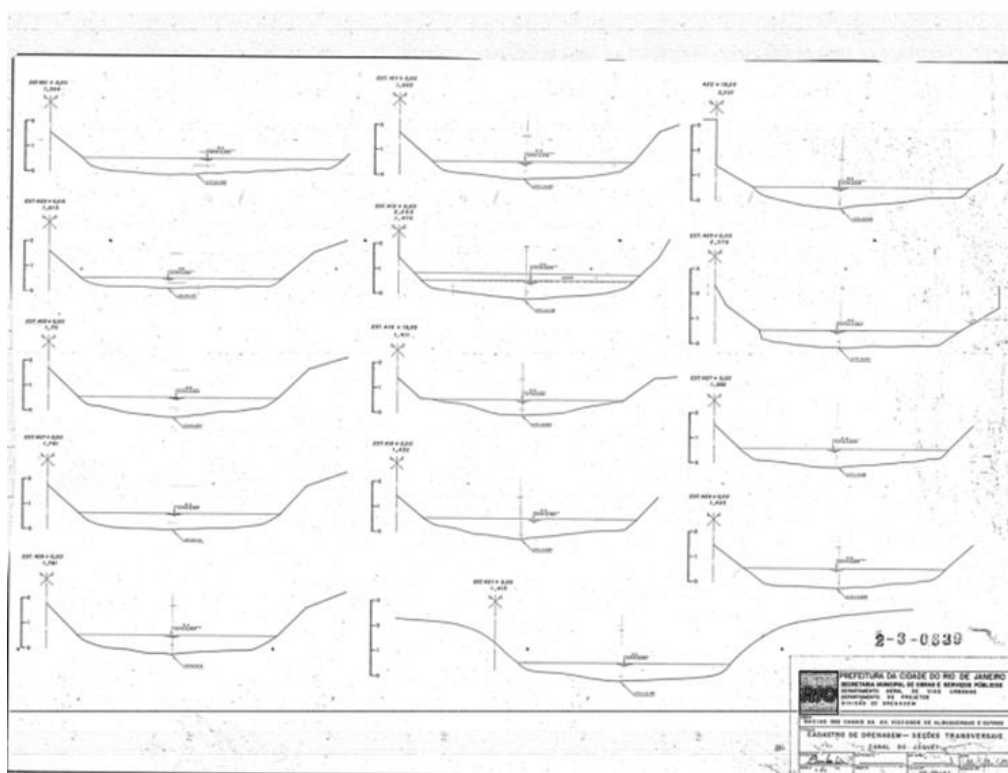


Figura 43 – Exemplo do perfil de um dos canais da região.

Fonte: Fundação Rio-Águas

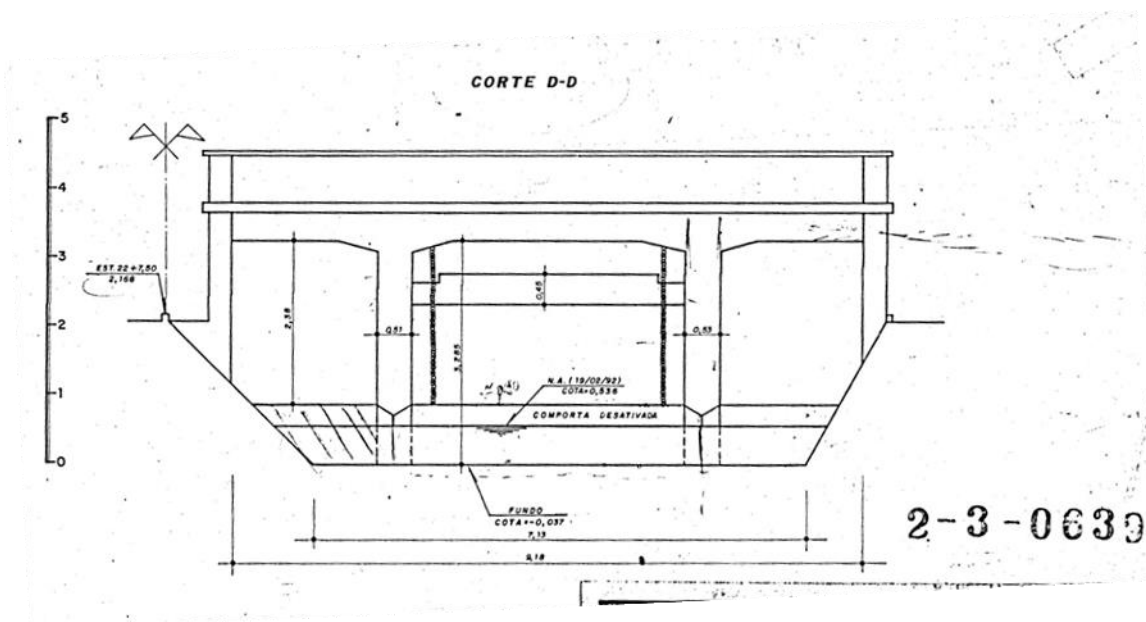


Figura 44 – Comporta do canal do Rio dos Macacos localizado na Rua General Garzón
Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro.

Durante a análise detalhada do Modcel, foi observado que o canal que atravessa o Jardim Botânico apresentava uma característica inadequada em relação à sua cota. Ao estar situado na mesma cota do restante do território, perdia sua identidade de canal, transformando-se em uma extensão plana de terreno. Essa representação equivocada comprometia a precisão e a realidade da simulação hidrológica.

Com o objetivo de corrigir essa incongruência e tornar o modelo mais fidedigno, procedeu-se à redução da cota do canal. Essa ação permitiu restabelecer sua forma e características originais, conferindo-lhe a função adequada de canal dentro do contexto do Modcel. Ao promover essa atualização, o modelo passou a refletir de forma mais acurada a topografia e a hidrodinâmica da região do Jardim Botânico.

4.4.2. Visita de campo para verificação dos registros de inundação

Algumas regiões podem ter sido mal interpretadas pelas fotos fazendo com que a estimativa de lâmina d'água estivesse muito acima ou muito abaixo da realidade. Por conta disso, foi necessário a realização de visitas em alguns locais para ter uma melhor estimativa sobre a lâmina d'água. Nessas visitas, as fotos tiradas em 2019 foram comparadas nos locais exatos das imagens, apresentadas nas Figuras 45, 46 e 47, usando como referência de medida objetos desses locais como muros, postes, árvores, entre outros. Com o auxílio de uma trena, foi possível estimar novos valores de lâmina d'água de alguns locais visitados, que serão inseridos numa nova tabela no capítulo seguinte.



Figura 45 - Visita Rua Jardim Botânico Altura do Parque Lage.



Figura 46 - Visita Rua Jardim Botânico no cruzamento da Rua Pacheco Leão.



Figura 47 – Visita hospital Miguel Couto.

4.4.3. Complementação de células e de ligações

Com o objetivo de aprofundar a compreensão sobre a influência do Rio Rainha na região do Jardim Botânico e estabelecer uma conexão entre esse rio e o Rio dos Macacos, que não estava contemplada no modelo existente, foi desenvolvida uma nova ligação do tipo G2 no Modcel. Ademais, foi necessário criar células, representando tanto o Rio Rainha como as suas margens, apresentadas na Figura 48, para abranger adequadamente o território da PUC Rio. Essas células foram estabelecidas com base em critérios geográficos e hidrológicos, visando capturar de maneira precisa as características e interações dos rios nessa região específica.



Figura 48 - Células localizadas na região da Gávea (PUC-Rio).
Fonte: Autores

Essa abordagem por meio de células permite uma análise mais detalhada do comportamento hidrológico e dos impactos do Rio Rainha, considerando sua influência na hidrologia local, nas áreas de drenagem e nos fluxos de água. Além disso, ao estabelecer a ligação entre o Rio Rainha e o Rio dos Macacos, é



possível avaliar os efeitos dessa conexão na dinâmica dos recursos hídricos, na qualidade da água e nos ecossistemas aquáticos.

4.4.4. Ajuste de coeficientes hidráulicos

Com o intuito de aprimorar a modelagem hidrológica e garantir resultados mais precisos, foram realizadas duas modificações importantes no Modcel. A primeira delas envolveu a troca do coeficiente de vertimento de 0.3 para 0.1. Esse coeficiente representa a fração de água que escoar da superfície de um terreno em resposta à precipitação. Reduzir esse valor para 0.1 significa dificultar o escoamento da drenagem superficial em estruturas com características de vertimento lateral, de maneira a melhor representar a conexão entre rios e suas margens em ambientes urbanos.

Outro fator no qual a modificação se fez necessária, foi o coeficiente de Manning. Esse coeficiente é utilizado para quantificar a resistência ao escoamento da água em canais e cursos d'água. Durante a análise do Modcel, foi identificado que em algumas ligações do modelo, esse parâmetro estava configurado com valores elevados, o que resultava em uma subestimação do fluxo de água. Para corrigir essa questão, foi necessário ajustar o coeficiente de Manning, tornando-o mais condizente com as características hidráulicas reais dos canais em estudo. Essa correção permitiu uma representação mais precisa do comportamento do fluxo de água, resultando em simulações mais confiáveis e próximas da realidade.



4.4.5. Ajuste de cotas das células de escoamento

Uma correção adicional realizada no Modcel envolveu o ajuste das cotas altimétricas, uma vez que foram identificadas diversas inconsistências nesse aspecto, especialmente nas proximidades da margem da Lagoa Rodrigo de Freitas e nos fundos dos canais. Com o intuito de obter maior precisão e acurácia nessa representação, recorreu-se às cotas fornecidas pelas plantas digitais disponibilizadas pela Mapoteca da Prefeitura do Rio de Janeiro.

A utilização das cotas das plantas digitais disponibilizadas pela Mapoteca da Prefeitura do Rio de Janeiro é uma fonte confiável e oficial de informações topográficas, que auxilia na calibração do modelo e na obtenção de dados consistentes. Essa abordagem considera as características físicas reais do terreno, resultando em simulações hidrológicas mais abrangentes e confiáveis. Além disso, essa calibração contribui para uma melhor compreensão dos processos de drenagem, do comportamento do fluxo de água e para a identificação de áreas críticas suscetíveis a problemas como enchentes e alagamentos.

4.4.6. Incorporação de novos registros para calibração

Além das complementações citadas, foram incorporados novos pontos de calibração, apresentados na Figura 49. Essa adição visa avaliar a correspondência do Modcel com a realidade em mais um local específico. A inclusão desse ponto de calibração representa um esforço adicional para aprimorar a precisão e a confiabilidade do modelo, garantindo que ele seja capaz de reproduzir de forma mais precisa os processos hidrológicos e hidrodinâmicos na área de estudo.

Além disso, a lógica de calibração por região deu espaço para uma lógica de calibração mais pontual, comparando-se a lâmina registrada com a lâmina simulada na célula de escoamento que engloba o local onde foi observada a



falha de drenagem. Ademais, devido ao elevado grau de dificuldade de estimar as lâminas de inundação a partir de um registro fotográfico, foi considerado um erro de mais ou menos 15 centímetros em relação à lâmina registrada. Esta consideração também permite levar em conta a possibilidade do registro fotográfico não ter sido realizado no pior momento da cheia fluvial, enquanto para a lâmina simulada, optou-se por considerar a maior lâmina calculada pelo modelo.

As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam as imagens que serviram como referência para o processo de calibração, bem como a lâmina estimada visualmente e o erro aceitável devido à incerteza da metodologia utilizada diante da falta de dados precisos para o processo de calibração.



Tabela 12 – Interpretação das lâminas de inundação registradas do evento de 2019.


Local	Registro fotográfico	Lâmina estimada (m)
Baixo Gávea		1,05 (lim.superior)
		0,90 (estimativa)
		0,75 (lim. Inferior)
Bartolomeu Mitre		0,60 (lim.superior)
		0,45 (estimativa)
		0,30 (lim. Inferior)

Tabela 13 - Interpretação das lâminas de inundação registradas do evento de 2019.




Local	Registro fotográfico	Lâmina estimada (m)
Borges de Medeiros		0,65 (lim.superior)
		0,50 (estimativa)
		0,35 (lim. Inferior)
PUC-Rio		0,60 (lim.superior)
		0,45 (estimativa)
		0,30 (lim. Inferior)
Rua Jardim Botânico		1,45 (lim.superior)
		1,30 (estimativa)
		1,15 (lim. Inferior)

Tabela 14 - Interpretação das lâminas de inundação registradas do evento de 2019.





Local	Registro fotográfico	Lâmina estimada (m)
Rua General Garzon		1,30 (lim.superior)
		1,15 (estimativa)
		1,00 (lim. Inferior)
Horto		0,45 (lim.superior)
		0,30 (estimativa)
		0,15 (lim. Inferior)
Parque Lage		0,57 (lim.superior)
		0,42 (estimativa)
		0,27 (lim. Inferior)
Miguel Couto		1,20 (lim.superior)
		1,05 (estimativa)
		0,90 (lim. Inferior)



Figura 49 - Pontos de calibração da Bacia de estudo.
Fonte: Autores



4.4.7. Resultados do processo de calibração

O processo de calibração na região de interesse tem como objetivo verificar se o Modcel é capaz de representar adequadamente as características hidrológicas e o comportamento do fluxo e acúmulo de água. Essa avaliação comparativa entre os resultados do modelo e os dados observados ou levantados na área de calibração permite identificar possíveis discrepâncias e ajustar o modelo para garantir uma representação mais fiel da realidade.

Na Figura 50, é apresentada a comparação entre as lâminas d'água registradas (estimadas) e as lâminas d'água simuladas. É importante ressaltar que as fotografias utilizadas como parâmetro de calibração podem não ter sido capturadas durante o momento de pico máximo de chuva. Diante dessa condição, foi adotada uma margem de erro de 15 centímetros para considerar possíveis variações.

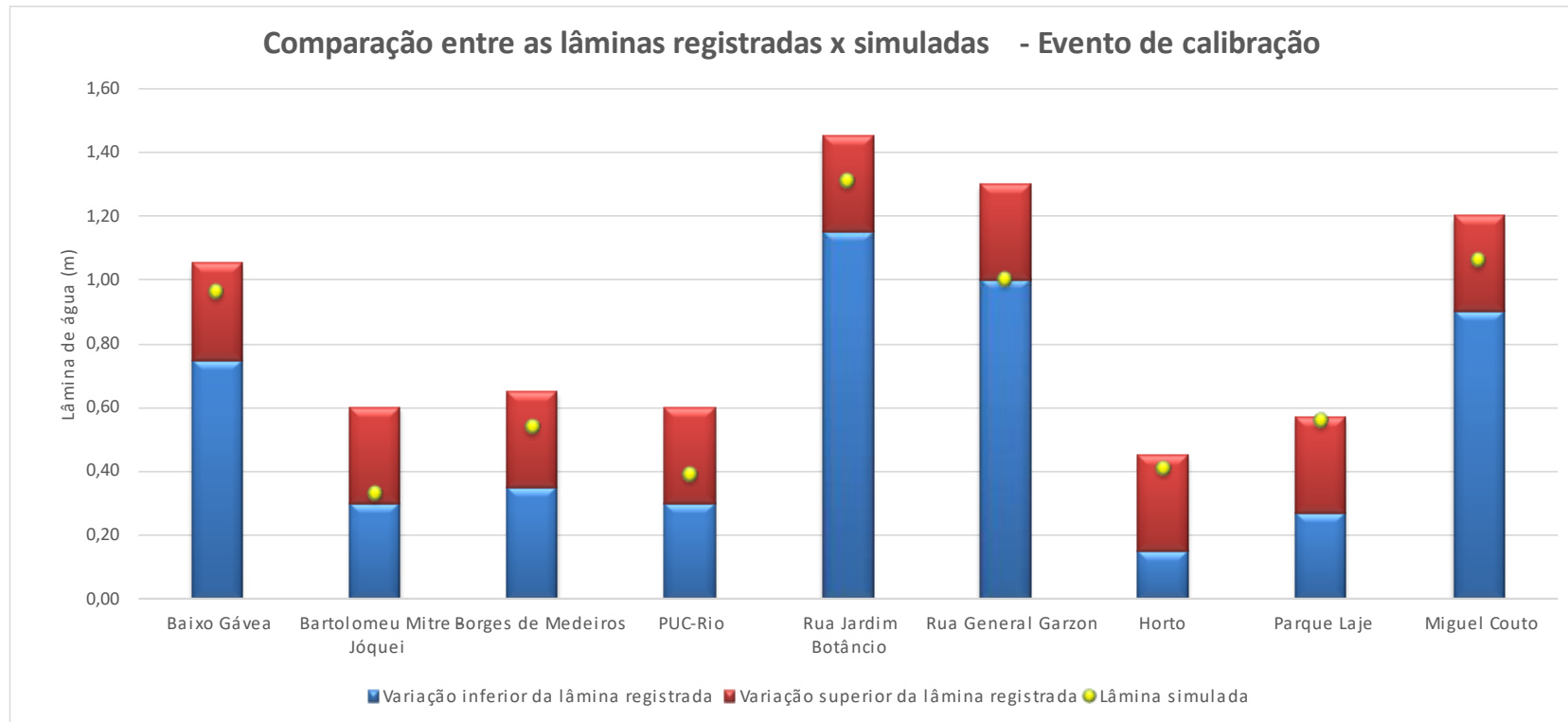


Figura 50 - Comparação entre lâmina registrada x simulada para o evento de 2019



Com base nas informações expostas anteriormente, é possível confirmar que o modelo utilizado neste estudo de caso foi devidamente calibrado e validado, demonstrando uma representação confiável de enchentes e intervenções potenciais relacionadas ao controle de inundações da região de interesse em 2019. Diante disso, é possível avançar para as próximas etapas de diagnóstico e de proposição de alternativas que utilizarão uma chuva típica do dimensionamento de sistemas de macrodrenagem com tempo de recorrência de 25 anos.

4.5. Diagnóstico das Cheias Urbanas

De acordo com Miguez et al. (2012), a bacia hidrográfica do Rio dos Macacos apresenta uma intrincada rede de escoamento que inclui trechos de canal natural e artificial, bem como galerias de drenagem. As áreas mais baixas e planas da bacia possuem várias regiões que permitem armazenamento temporário e escoamento superficial, formando redes complementares e secundárias ao sistema principal de drenagem. A transposição de parte da vazão entre os rios dos Macacos e Rainha por meio do Canal do Jóquei é outro fator que contribui para a complexidade do funcionamento da rede de drenagem. Além disso, há interferência na foz do sistema, que é influenciado pelo remanso da Lagoa Rodrigo de Freitas e do oceano. Com base nas análises realizadas, verificou-se que as áreas mais afetadas são as mais baixas com maior bacia hidrográfica de contribuição, como a Rua Jardim Botânico, principalmente no cruzamento com a Rua Pacheco Leão. Em situações de chuvas intensas, as imediações desta área registram níveis de alagamento que variam de 0,80m a 1,00m. Também foi registrado o extravasamento do Rio dos Macacos a partir do canal da Rua General Garzón, resultando em inundações de regiões como o Horto, apesar de ser um ponto com declividade, e o próprio cruzamento da Rua Jardim Botânico e Pacheco Leão. De acordo com Takita e Câmara (2023), a inundação no bairro da Gávea pode ser explicada pelo extravasamento do Rio Rainha, em que sua



menor margem está em torno de 3,67m, e no caso do evento de 2019, está margem foi ultrapassada devido ao excesso de volume d'água.

Os principais motivos que causam a falha da rede de drenagem são: Subdimensionamento, falta de manutenção, topografia local e obstruções no exutório da bacia (MIGUEZ et al., 2012). Esses motivos podem ser relacionados a falta de controle de ocupação, acúmulo de resíduos impedindo o escoamento na rede, entre outros. A bacia do Rio dos Macacos apresenta problemas decorrentes de cada um destes fatores: a falta de planejamento de ocupação, como pode ser evidenciada pelo breve histórico relatado anteriormente; a presença de assoreamento na calha e estrangulamentos gerados por subdimensionamentos hidráulicos.

Nesta etapa da metodologia, será utilizada a base de simulação calibrada para o evento de 2019, considerando que não houve uma alteração significativa na bacia hidrográfica da data do evento até a situação atual. Além disso, o evento pluviométrico de calibração será substituído por uma chuva de projeto elaborada para o tempo de recorrência típico do dimensionamento de estruturas de macrodrenagem, correspondente ao TR de 25 anos. A duração da chuva de projeto, considera a chuva crítica da bacia hidrográfica principal, a bacia do Rio dos Macacos, que é equivalente ao seu tempo de concentração de 70 minutos. De maneira a manter o intervalo de tempo utilizado na etapa de calibração (15 em 15 minutos), a chuva de projeto foi aproximada para 75 minutos de duração, considerando então 5 intervalos de tempo. Esta consideração para a chuva de projeto foi utilizada também para os cenários de alternativas, de maneira a tornar o cenário atual, aqui citado, como base de comparação para os resultados de mitigação gerados pelos cenários propositivos.

Os resultados serão apresentados por perfis máximos de inundação, lâminas máximas pontuais em regiões críticas e manchas de inundação mostrando de forma espacial as consequências dos eventos de cheia. Para a elaboração das manchas de inundação, serão desconsideradas inundações inferiores a 20

centímetros. Esta escolha de representação foi estimada a partir de visitas de campo realizadas na área de estudo que demonstram que o nível da calçada se encontra a 0,20m da rua. Com isso, as falhas do sistema de drenagem não afetariam os pedestres, e os seus efeitos negativos poderiam ser desprezados.

O desnível entre a rua e as edificações foi cuidadosamente medido em campo pelos autores em várias áreas representativas da realidade observada nas edificações ao longo da bacia do Rio dos Macacos. As medições do desnível estão apresentadas nas Figuras 51 e 52, considerando a distância entre a rua e a calçada, bem como entre a calçada e o nível da primeira mureta das edificações. Esses dados foram essenciais para determinar o nível mínimo da mancha de inundação a ser representado, estimado em 20 centímetros.



Figura 51 - Medição do desnível de 25 cm entre a rua e a calçada em frente ao Hospital Miguel Couto.
Fonte: Autores



Figura 52 - Medição do desnível de 20 cm entre a rua e a calçada na PUC-Rio.
Fonte: Autores



4.6. Simulação de alternativas

A fim de solucionar o problema de alagamentos na bacia do Rio dos Macacos, podem ser adotadas medidas como a abertura da foz do rio que pode ser importante para o controle de cheias. No entanto, essa ação não seria suficiente para resolver completamente o problema. Para reduzir os níveis de alagamento, é necessário corrigir pontos obstrutivos na rede de drenagem e combinar medidas de amortecimento em reservatórios para aumentar a capacidade de escoamento. Essas medidas, juntamente com as ações de desobstrução da foz, podem gerar soluções mais sustentáveis a longo prazo, abordando não apenas a condução, mas também a geração descontrolada de escoamento. É fundamental reequilibrar a distribuição dos escoamentos no tempo e no espaço para lidar com problemas de cheias em uma região. Essas medidas complementares podem ajudar a resolver o problema de alagamentos de maneira mais eficaz. Nos próximos itens, detalharemos algumas soluções para o problema de alagamentos, que partem das soluções propostas por Miguez *et al.* (2012). É importante mencionar que este trabalho não abordará um estudo de viabilidade econômica das soluções de mitigação de inundações aqui propostas.

4.6.1. Cenário 1 de Alternativas de Controle de Inundações – Obras Corretivas da Lagoa Rodrigo de Freitas

A alternativa do projeto de recuperação da Lagoa é dividida em 4 ações: (1) desobstrução e alteração da rede de drenagem do cruzamento entre as ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão; (2) fechamento da saída do Canal do Jóquei para o Rio dos Macacos; (3) abertura da comporta da Rua General Garzón; e (4) a instalação de uma rede de drenagem na região do hospital Miguel Couto. A seguir são apresentados alguns detalhes a respeito das intervenções.

Em relação a abertura da comporta da Rua General Garzón o Rio dos Macacos contribuiria diretamente com a Lagoa e sua capacidade seria aumentada em mais 80 centímetros. A Figura 53 apresenta uma fotografia da comporta no exutório do Rio dos Macacos e a Figura 54 a localização desta comporta na região.



Figura 53 - Encontro do Rio dos Macacos com Lagoa Rodrigo de Freitas com a Comporta fechada. Foto tirada 02/06/2023.



Figura 54 - Localização comporta na Rua General Garzón que separa o Rio dos Macacos e a Lagoa Rodrigo de Freitas

A proposta de alteração da galeria do Rio dos Macacos, apresentado na Figura 55, situada entre as ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão, tem como objetivo diminuir o nível d'água que surge no local nos dias chuvosos, visto que a rede atual não é suficiente. Inicialmente, a alteração da galeria teve como objetivo adequar suas dimensões às do canal na Rua General Garzón conforme sugerido por Miguez *et al.* (2012), porém, serão sugeridas alterações para otimizar o projeto. É importante ressaltar que obras de ampliação de galerias podem aumentar o valor da vazão a jusante.



Figura 55 - Região onde ocorrerá a ampliação da galeria

A próxima solução diz respeito ao fechamento da comunicação do Canal do Jóquei com o Rio dos Macacos, ilustrado nas Figuras 56 e 57, através de uma comporta em sentido único (FLAP), em que permite o fluxo de água no sentido Canal do Jóquei à Rio Rainha. Essa conformação permite que o Rio dos Macacos deságue livremente na Lagoa Rodrigo de Freitas, sem receber as águas do Rio Rainha. A comporta seria construída entre o canal do Jóquei e a Avenida Bartolomeu Mitre, de acordo com a Figura 58.



Figura 56 – Posição para a comporta que separa as bacias do Rio Rainha e do Rio dos Macacos.



Figura 57 - Canal do Jóquei no trecho de encontro com o Rio dos Macacos

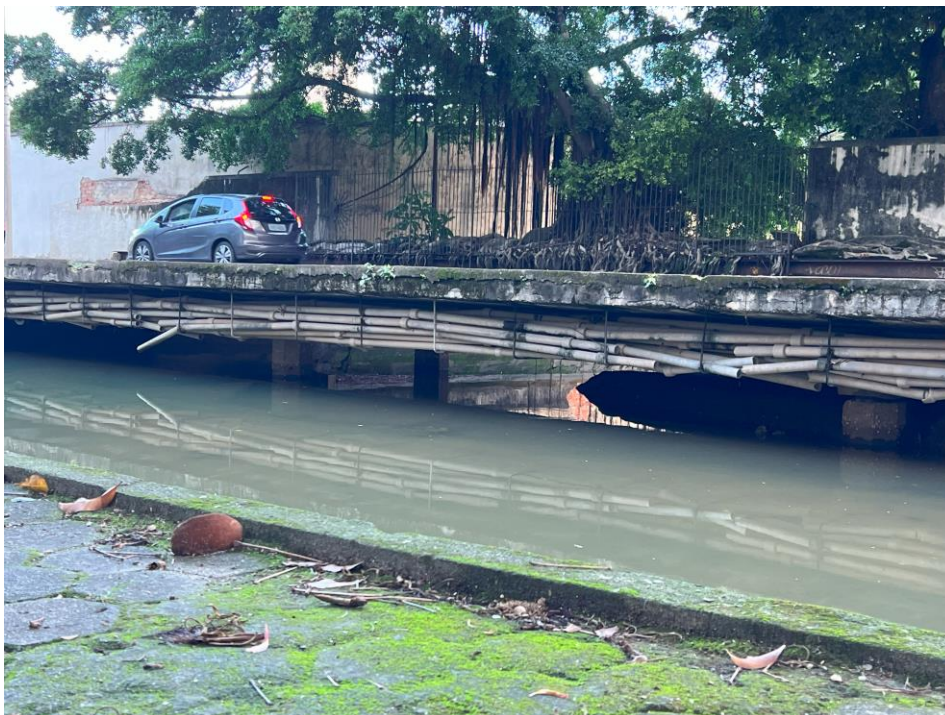


Figura 58 - Canal do Jóquei no trecho de encontro com o Rio dos Macacos

Próximo à localização prevista para a implantação da nova comporta, existe a possibilidade viável de realizar a instalação de uma galeria com dimensões de 2 metros de altura por 4 metros de largura na região adjacente ao Hospital Miguel Couto, situado na Rua Mário Ribeiro, compreendendo o trecho entre a Avenida Visconde de Albuquerque e a Lagoa Rodrigo de Freitas, mostrado na Figura 59. Essa medida tem o mesmo propósito da ampliação mencionada anteriormente, ou seja, visa mitigar o acúmulo de água que ocorre nessa área durante períodos de precipitação intensa. Adicionalmente, será implementada uma soleira de 0,2 metros no início da galeria, permitindo o escoamento das águas provenientes do Rio Rainha somente em momentos de chuvas mais intensas. Além disso, será ampliado o número de bocas de lobo na região, a fim de melhorar o sistema de captação de águas pluviais. Por fim, uma vez que a galeria será expandida abaixo do nível da Lagoa, será necessário instalar uma comporta de 0,4 metros de altura no ponto de encontro da galeria com a Lagoa, no cruzamento entre a Rua Mario Ribeiro e a Avenida Borges de Medeiros.

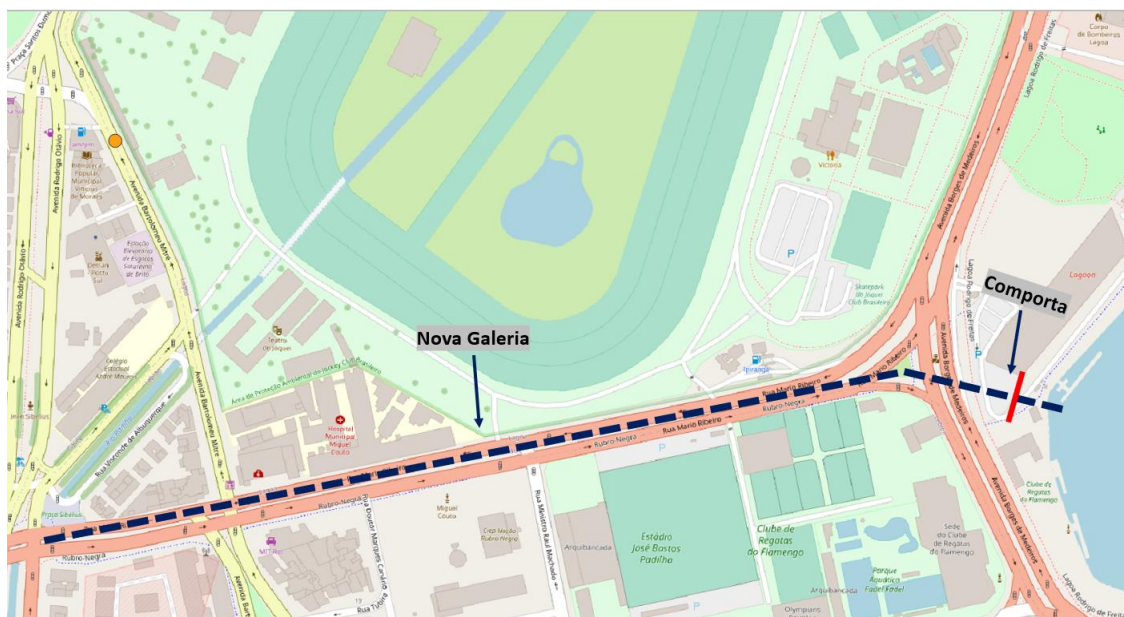


Figura 59 - Indicação do trecho da nova galeria na Rua Mário Ribeiro.



Levando em consideração a implementação das obras na bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas, foi discutida a possibilidade de complementar essas ações para minimizar as inundações e melhorar o sistema de drenagem do Rio dos Macacos. Essa ideia significa que, além da proposta original de recuperação da região, outras medidas podem ser realizadas para controlar as inundações na região do Jardim Botânico. Duas dessas medidas são a instalação de reservatórios de retenção nas áreas de encostas e a instalação de um único reservatório de retenção dentro do Jardim Botânico. Ambas as medidas visam ajudar a controlar as inundações de maneira mais eficiente e serão melhor exploradas nos cenários expostos a seguir.

4.6.2. Cenário 2 de Alternativas de Controle de Inundações - Reservatório Jardim Botânico

O Cenário 2 considera as intervenções apresentadas no Cenário 1 somadas a um reservatório de retenção *in line* localizado no Jardim Botânico.

A alternativa da implantação do reservatório de retenção no Jardim Botânico, é uma medida de amortecimento para reduzir o nível de alagamento da região. O reservatório proposto por Miguez *et al.* (2012) tem como área cerca de 20.000 m² e volume 30.000 m³. A Figura 60 mostra, esquematicamente, a área para a implantação do reservatório.



Figura 60 - Indicação das áreas de armazenagem temporárias no Jardim Botânico

4.6.3. Cenário 3 de Alternativas de Controle de Inundações – Reservatórios de encosta

Neste cenário, temos como alternativa ao reservatório do Jardim Botânico a implantação de reservatório de detenção menores distribuídos ao longo das encostas da região. No contexto do cenário 3, as intervenções seriam implementadas de forma simultânea às ações do cenário 1. Os reservatórios foram alocados em áreas desocupadas, e não seria necessário a alteração do tráfego de veículos no local, nem a desapropriação de nenhuma edificação. Ao total foram instalados 9 reservatórios que podem ser apreciados na Figura 61.



Figura 61 - Indicação das áreas de armazenagem temporárias (Reservatório de encosta) na Bacia do Rio dos Macacos com as curvas de nível.

Os dados dos reservatórios, numerados de 1 a 9, estão registrados na Tabela 15 e retratados em uma representação ampliada nas Figuras 62, 63, 64 e 65. Essas informações passaram por uma análise criteriosa, levando em consideração as curvas de nível locais no software QGIS, com foco em áreas de declividade significativa e com elevada capacidade de escoamento. No MODCEL, foram realizadas avaliações dos seguintes parâmetros: lâmina máxima, área do espelho d'água máximo, altura do vertedor e volume potencial.



Tabela 15 - Informações dos reservatórios de encosta e resultados da simulação de TR 25.

Reservatório	Local	Lâmina máxima (m)	Altura do Vertedor (m)	Diametro de saída (mm)	Área espelho d'água máximo (m ²)	Volume Potencial (m ³)
1	Rocinha	7,22	7,40	400	1742	7873
2	Gávea	4,88	5,00	400	2721	13605
3	Horto	9,31	9,50	400	6023,5	55838
4	Horto	6,5	6,70	400	2347	9702
5	Horto	7,8	8,00	400	3105	15390
6	Jardim Botânico	9,8	10,00	500	968	9482
7	Jardim Botânico	6,14	6,30	400	2915	11531
8	Parque Lage	6,65	6,80	400	872	4359
9	Parque Lage	3,9	4,10	400	854	2521

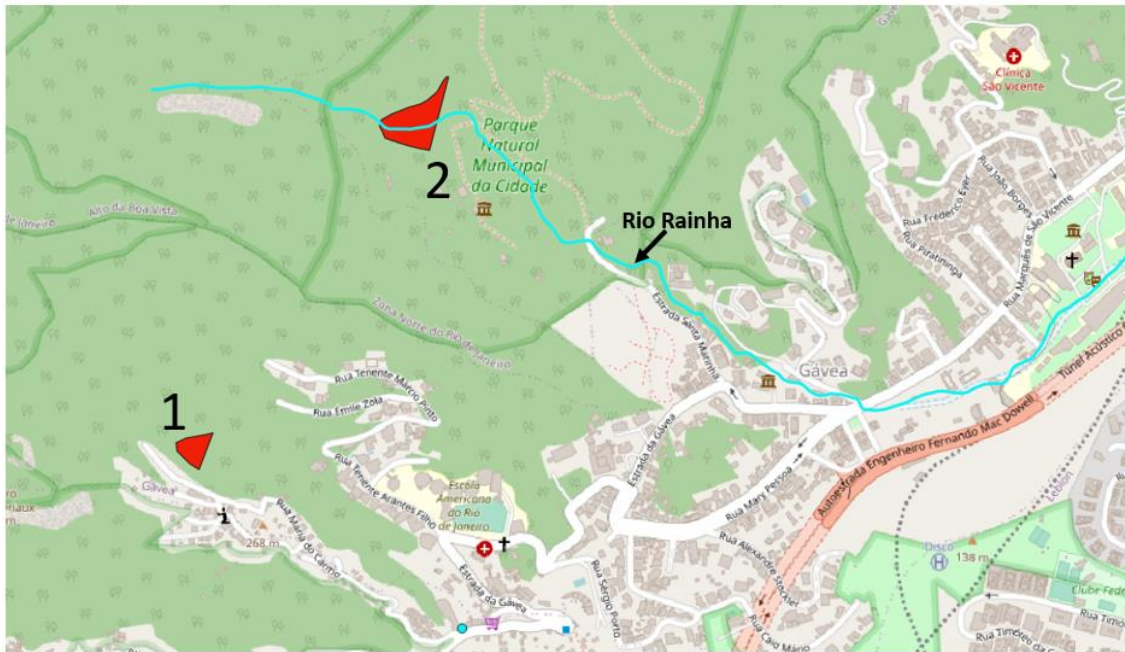


Figura 62 - Indicação reservatórios 1 e 2



Figura 63 - Indicação reservatórios 3, 4 e 5.



Figura 64 - Indicação reservatórios 6 e 7.



Figura 65 - Indicação reservatórios 8 e 9.

4.6.4. Cenário 4 de Alternativas de Controle de Inundações Completo

No cenário 4, serão contempladas todas as intervenções propostas, englobando assim os cenários 1, 2 e 3 de forma integrada. Nesse contexto, o objetivo é realizar uma análise abrangente dos impactos e comparar os resultados obtidos por meio dessa solução com os resultados das soluções aplicadas de forma isolada. Dessa forma, almeja-se uma avaliação criteriosa que permita identificar as vantagens e desvantagens dessa abordagem conjunta, visando aprimorar a compreensão dos efeitos sinérgicos e promover uma tomada de decisão embasada e eficiente.

Alguns locais ainda enfrentaram o desafio do acúmulo de água devido à topografia e à depressão do terreno. Nesse sentido, seria necessária a ampliação da rede de microdrenagem, embora essa questão não esteja abordada no escopo do presente trabalho. No entanto, para demonstrar os



resultados obtidos, foram instaladas bocas de lobo em locais onde, mesmo após a combinação dos cenários, persistiram problemas significativos de acúmulo de água. Esses locais incluem a PUC, Baixo Gávea e Parque Lage.

4.6.5. Resumo de cenários analisados

A Tabela 16 apresenta o resumo das alternativas de mitigação de inundações da Bacia do Rio dos Macacos apresentadas nesse trabalho.



Tabela 16 - Alternativas de soluções propostas.

Cenário	Descrição	Percurso (aproximado)
Cenário 1	<ul style="list-style-type: none"> • Desobstrução e alteração da Galeria do Rio dos Macacos a montante do canal da Rua General Garzón. • Abertura da comporta da Rua General Garzón com desassoreamento do seu canal. • Fechamento da saída do Canal do Jóquei para o Rio dos Macacos. • Instalação da Galeria em frente ao hospital Miguel Couto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliação galeria: Rua Jardim Botânico, nº 768. • Abertura da comporta (Rua General Garzón, nº 497) • Avenida Visconde de Albuquerque, nº 1302 • Rua Mario Ribeiro (Trecho entre Av. Visconde de Albuquerque e Lagoa Rodrigo de Freitas)
Cenário 2	Cenário 1 + Implantação de reservatório de retenção no interior do Jardim Botânico de capacidade de 30.000 m ³ .	<ul style="list-style-type: none"> • Rua Jardim Botânico, trecho nº 971 até nº 1302.
Cenário 3	Cenário 1 + Implantação de reservatórios de retenção nas áreas de encosta.	<ul style="list-style-type: none"> • Rocinha • Gávea • Jardim Botânico • Parque Lage
Cenário 4	Cenário 1 + Cenário 2 + Cenário 3 + Obras de Microdrenagem	<ul style="list-style-type: none"> • Praça Santos Dumont, 126 • Rua Jardim Botânico, 414 • Av. Padre Leonel Franca



5 RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os resultados do processo de simulação hidrodinâmica para o cenário atual e para os 4 cenários de projeto estudados. Serão utilizadas as chuvas com o tempo de recorrência de 25 anos para a verificação do resultado das alternativas de mitigação de inundações.

5.1 Cenário 0 – Situação Atual TR 25

Neste cenário, busca-se avaliar a extensão da área inundada no modelo para o Tempo de Retorno de 25 anos na bacia estudada, considerando a ausência de qualquer tipo de intervenção. O objetivo é compreender como a mancha de inundação se desenvolve e quais regiões são afetadas, oferecendo uma visão abrangente das potenciais consequências sem a implementação de medidas mitigadoras. A Figura 66 apresenta a mancha de inundação para o Cenário 0, além disso, a Figura 67 apresenta a lâmina d'água das regiões mais críticas e as Figuras 68 e 69 os perfis de níveis máximos no Canal do Rio dos Macacos e Canal do Jóquei para o Cenário 0.

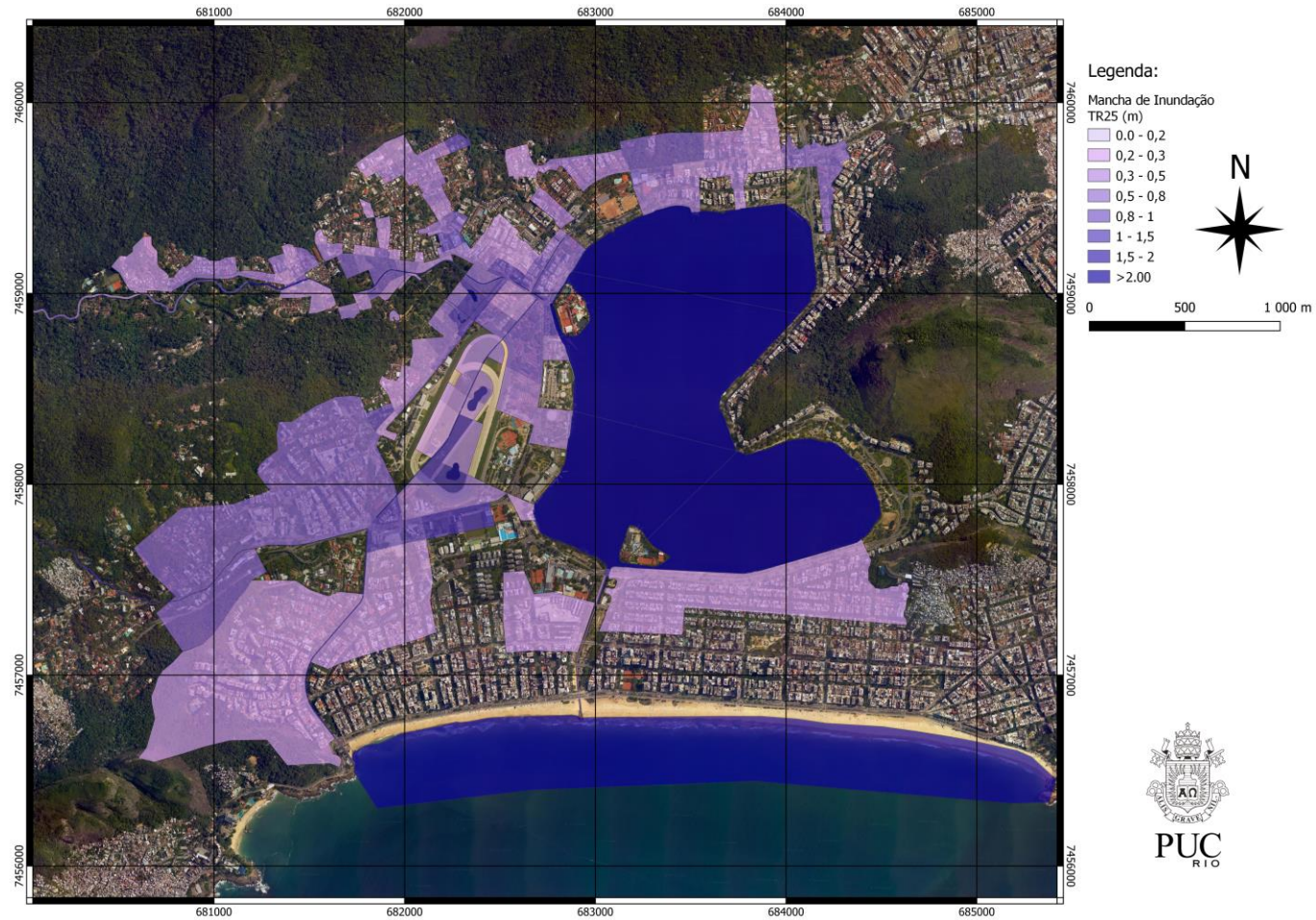


Figura 66 - Mancha de inundação do Cenário 0.

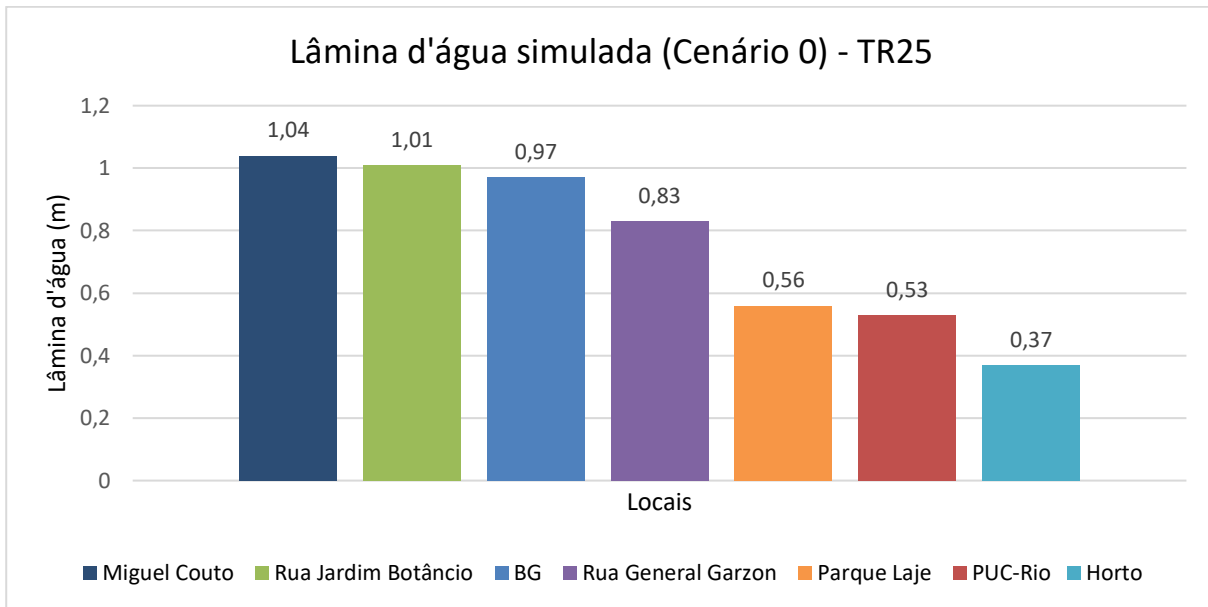


Figura 67 - Lâmina d'água do Cenário 0 nas regiões mais críticas.

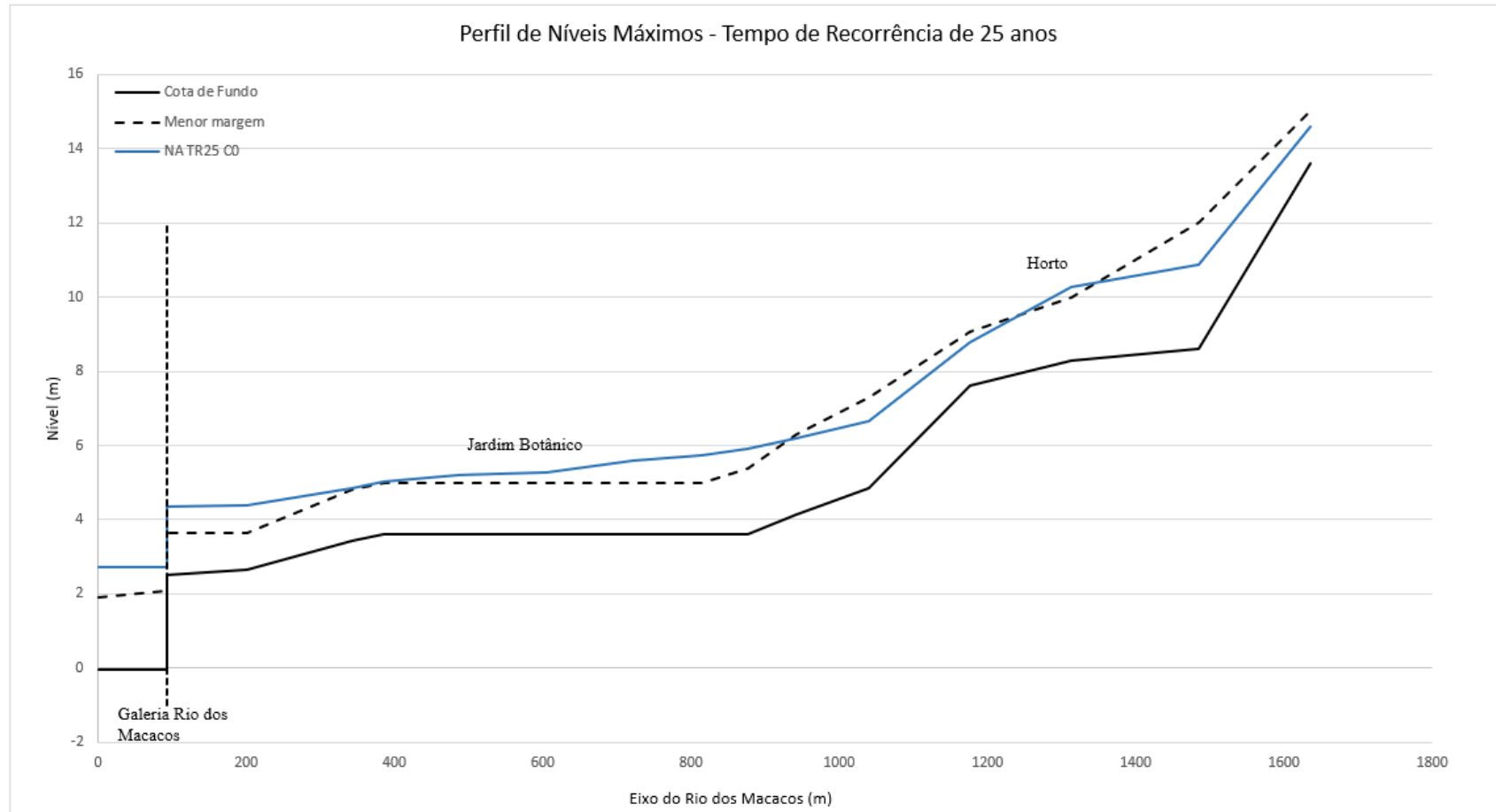


Figura 68 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para o Cenário 0.

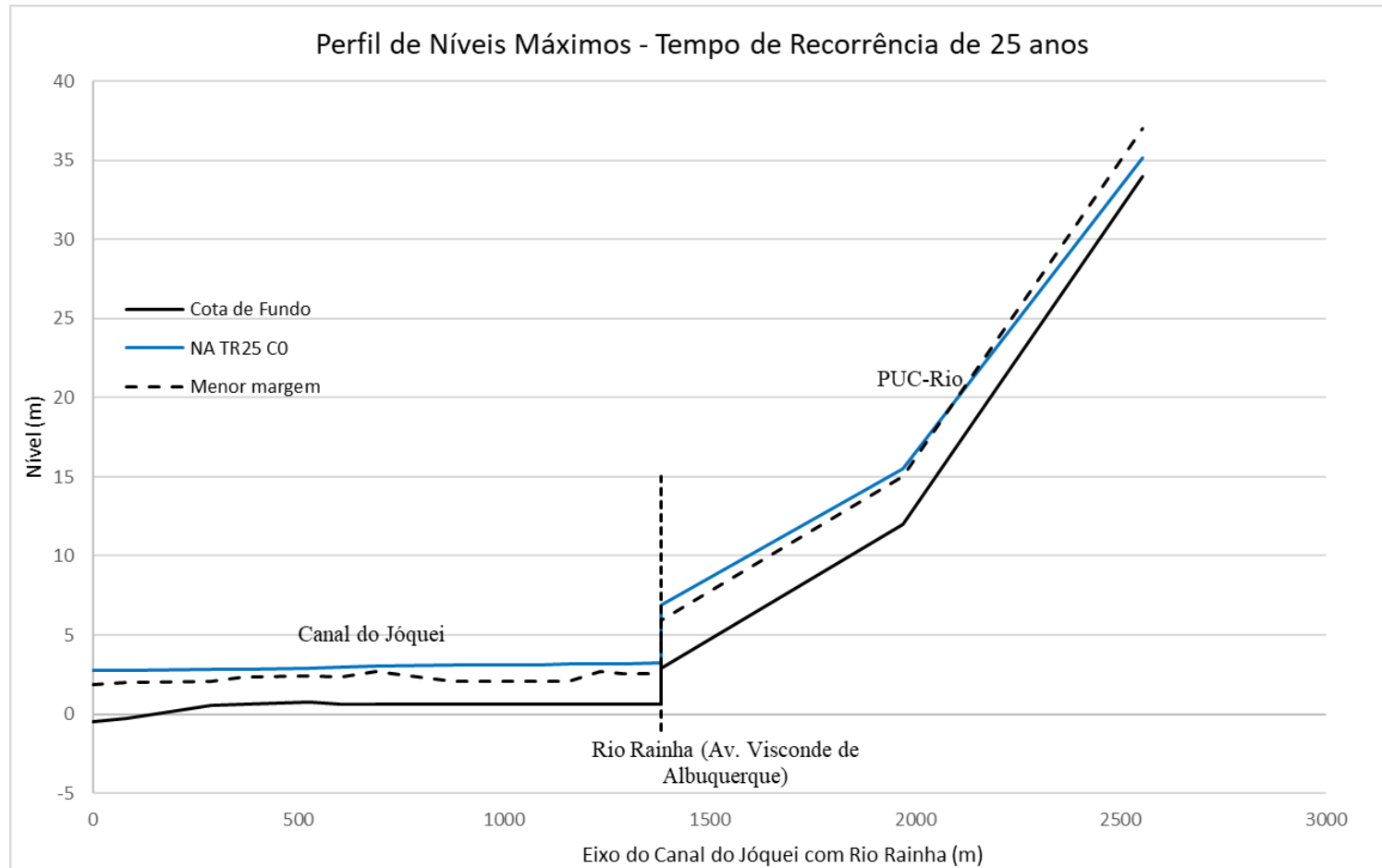


Figura 69 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para o Cenário 0.

Os resultados evidenciam a falta de capacidade dos cursos d'água nos principais rios da região, gerando extravasamentos no Horto, Jardim Botânico, Jóquei e PUC-Rio. São verificados Subdimensionamentos hidráulicos, com destaque para a galeria de drenagem do Rio Rainha, sob o encontro da Rua Pacheco Leão e a Rua Jardim Botânico. A Figura 70 apresenta a vista de montante do local onde se localiza o estrangulamento hidráulico gerado pela referida galeria.



Figura 70 - Rio dos Macacos no trecho antes de entrar na galeria da Rua Jardim Botânico.

Fonte: Autores

A estreita faixa de urbanização entre a Lagoa Rodrigo de Freitas e as encostas, onde se concentram as principais vias de trânsito, áreas de lazer e comércio, é o trecho mais afetado pela falta de espaço para acomodar inundações na bacia do Rio dos Macacos. Embora o parque do Jardim Botânico ajude a amortecer a ação das chuvas intensas, as inundações provocam prejuízos para a população,



riscos à saúde pública e interrupção do sistema viário. Os canais de concreto que interligam o Rio dos Macacos e o Rio Cabeça são agravantes desse cenário, já que durante a chuva de projeto há elevação acentuada do nível d'água, chegando ao transbordamento para as ruas. A comporta na foz do Rio dos Macacos, responsável pelo controle de descarga, é outra preocupação, aumentando a perda de carga e a restrição hidráulica do exutório do sistema de macrodrenagem.

É possível constatar, no presente cenário, que as áreas sujeitas a inundação são congruentes com as identificadas no modelo correspondente ao evento pluviométrico de 2019.

5.2 Cenário 1 – Obras corretivas da Lagoa Rodrigo de Freitas

Os resultados da simulação do Cenário 1 são apresentados na Figura 71 através da mancha de inundação para o TR 25 anos. Além disso, na figura 72 está representado a lâmina d'água neste cenário.

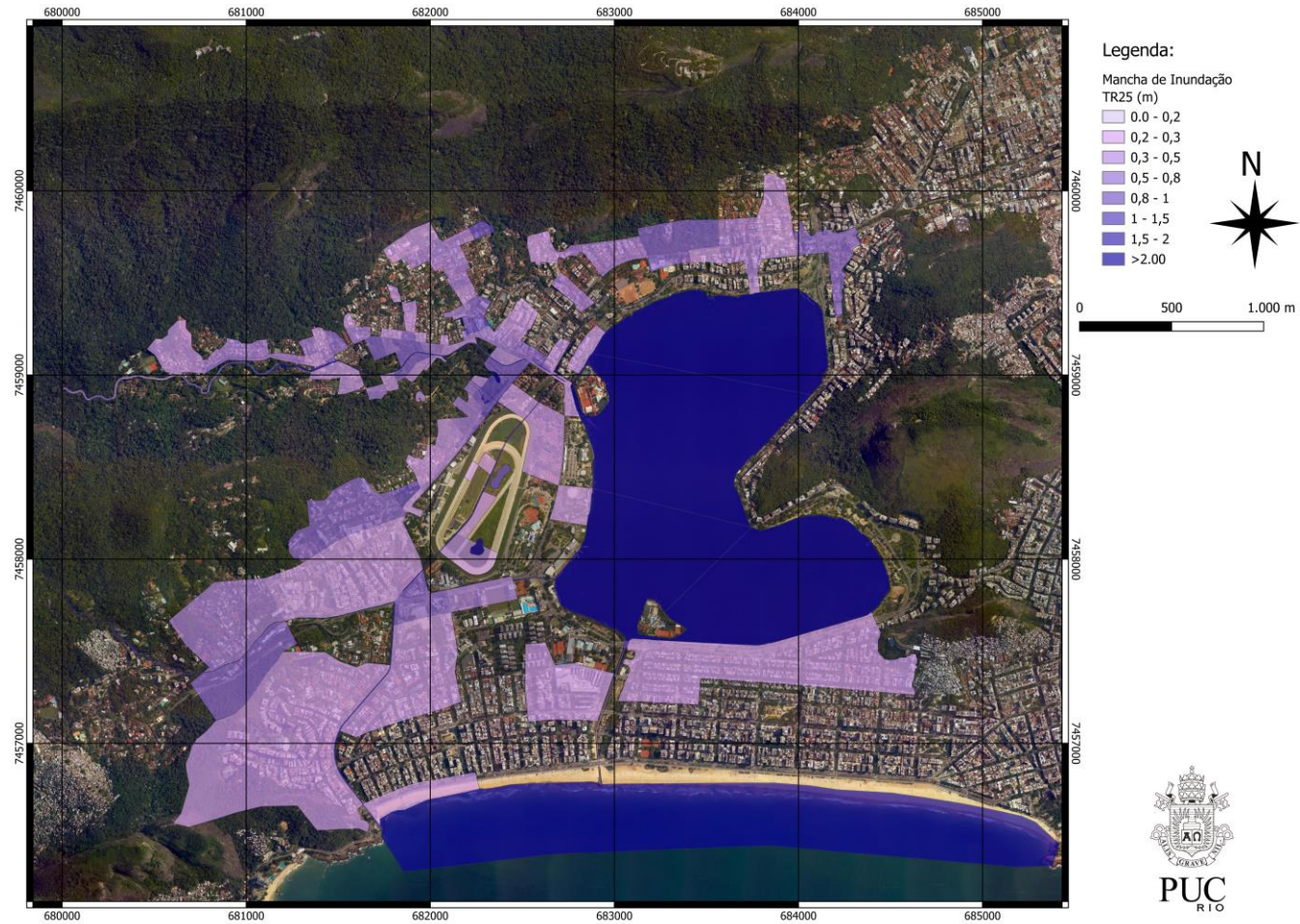


Figura 71 - Mancha de inundação do Cenário 1.

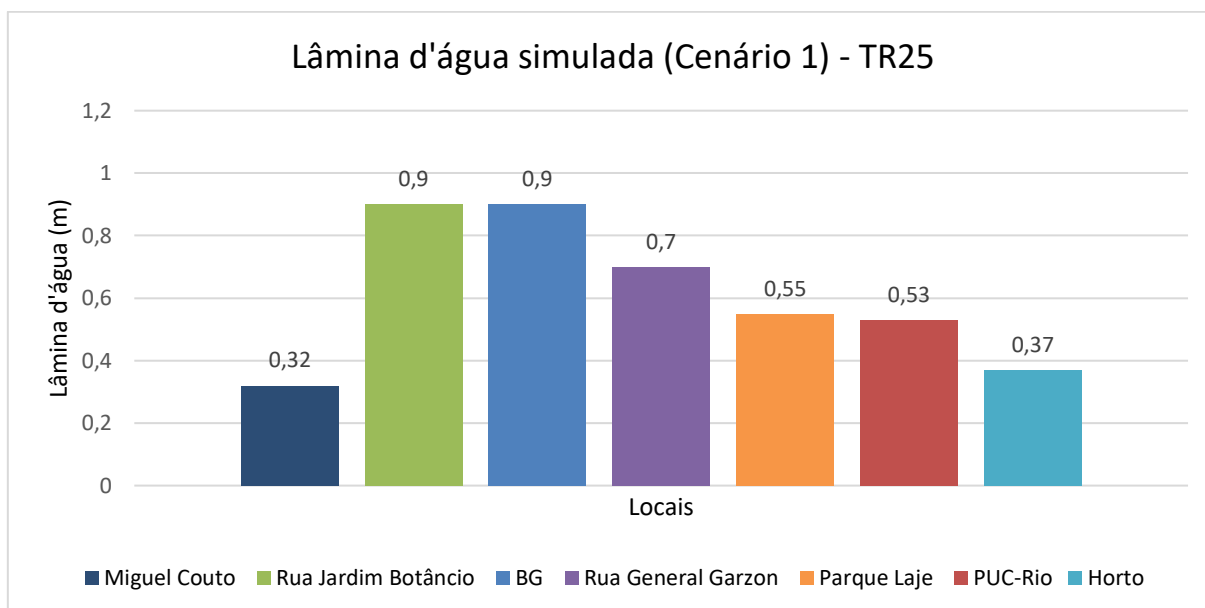


Figura 72 - Lâmina d'água simulada no Cenário 1.

Ao compararmos este cenário com o Cenário 0 (situação atual), é possível observar uma redução significativa na lâmina d'água em algumas áreas, como o Hospital Miguel Couto e a Rua General Garzón. No caso da região do Hospital Miguel Couto, a implantação da galeria resultou em uma redução de 69,2% na lâmina d'água, um resultado bastante promissor. Já a abertura da comporta na Rua General Garzón resultou em uma redução de 15,6% na lâmina d'água, embora ainda se mantenha uma lâmina de 70 cm. É importante ressaltar que outras regiões não foram afetadas pelas mudanças neste cenário, como é o caso da região da PUC-Rio, que manteve sua lâmina mesmo após o fechamento do canal do Jóquei com o Rio Rainha, contrariando as expectativas de que essa intervenção teria impacto nessa região.

Na Figura 73 e 74 apresenta o perfil de níveis d'água máximos no Rio dos Macacos e Canal do Jóquei do Cenário 0 e Cenário 1.

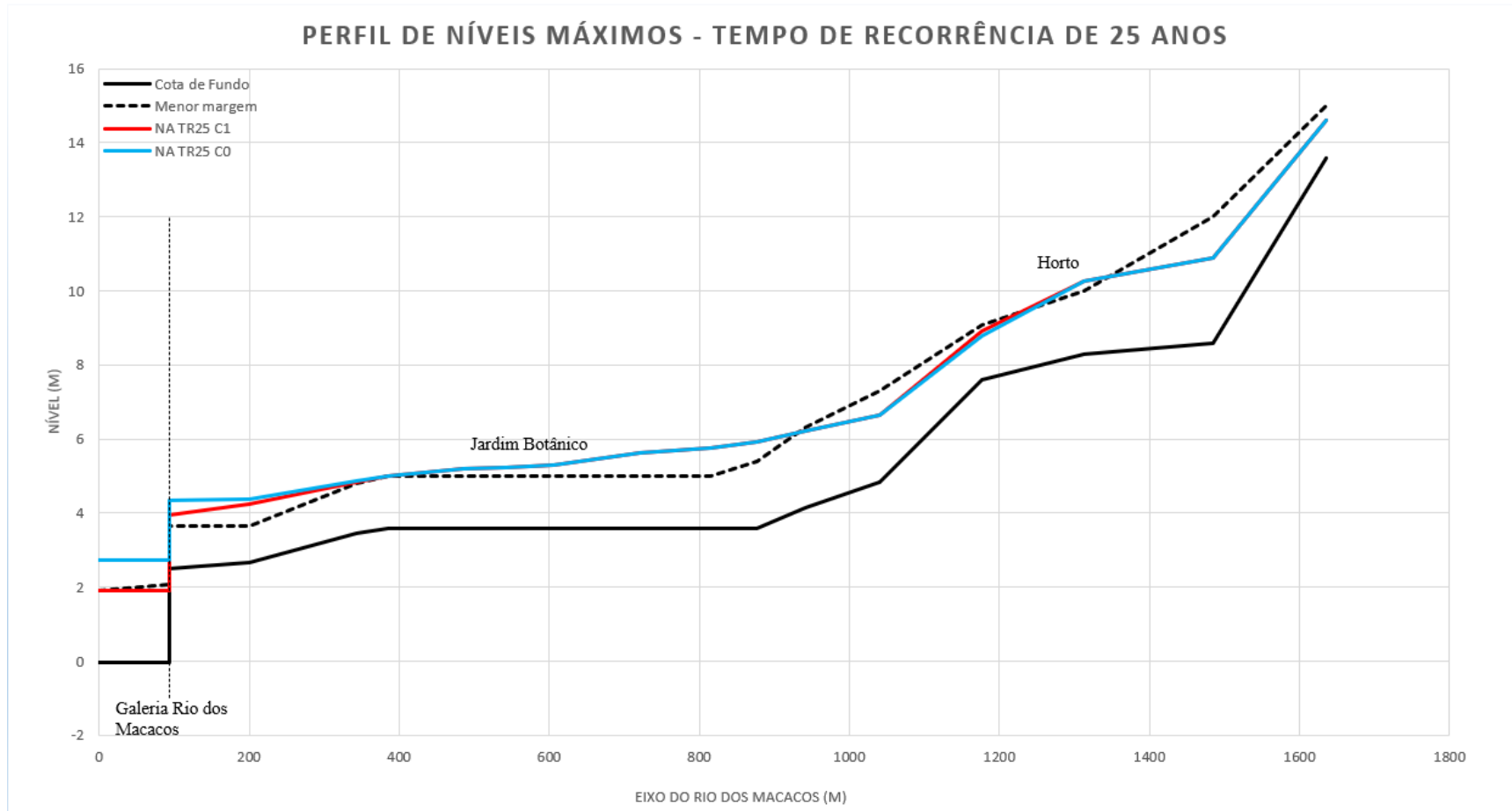


Figura 73 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para o Cenário 0 e Cenário 1.

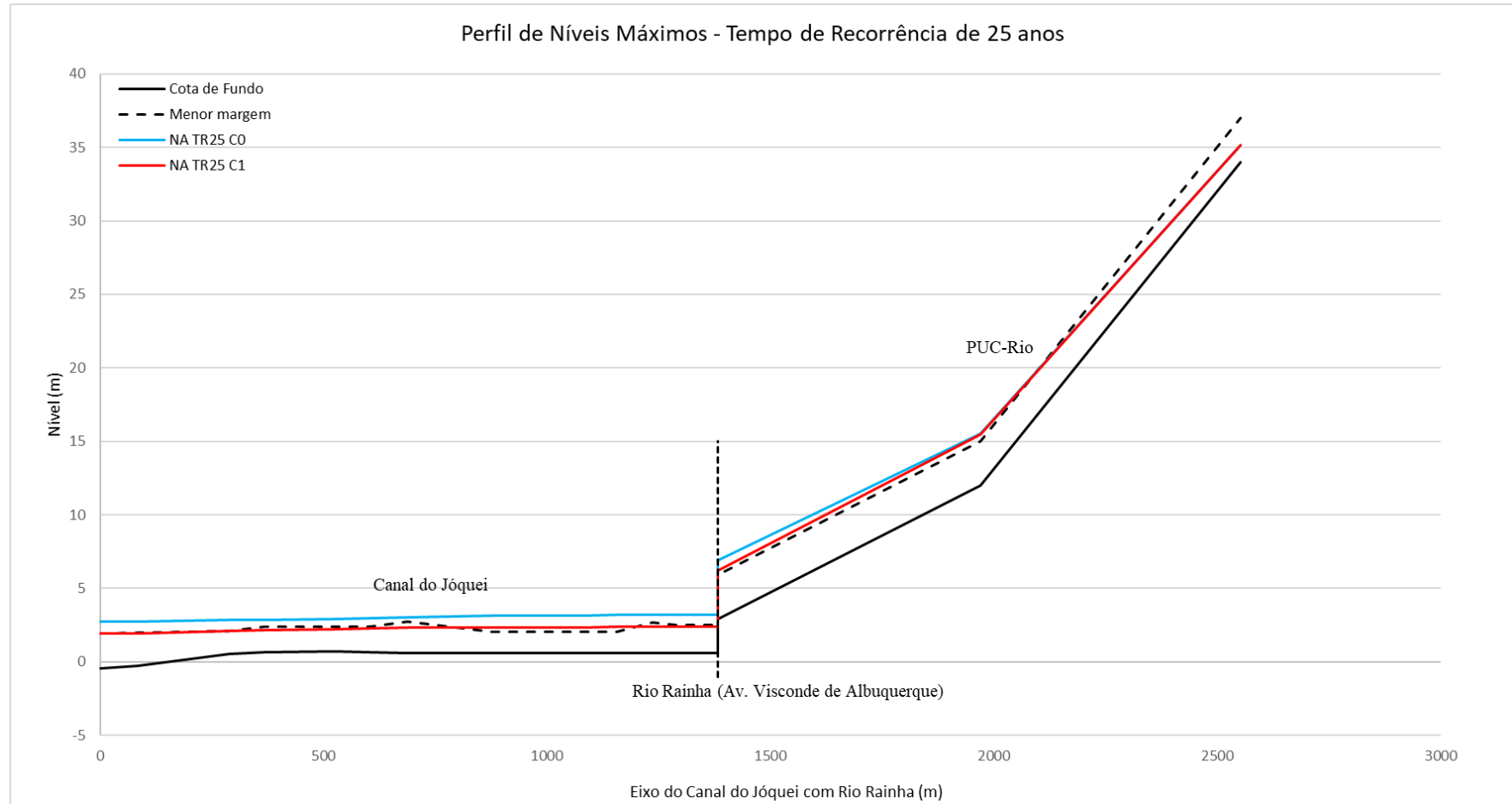


Figura 74 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para o Cenário 0 e Cenário 1.



Por fim, uma das medidas propostas nesse cenário consiste na expansão da galeria do Rio dos Macacos localizada no cruzamento entre a Rua Pacheco Leão e a Rua Jardim Botânico. Com essa ampliação, a galeria agora possui um diâmetro de 2,6 metros. Essa solução foi fundamentada na proposta de Miguez *et al.* (2012), entretanto, no trabalho original, a galeria apresentaria dimensões de 2,40 metros de altura por 6,50 metros de largura. No próximo cenário, será realizada uma comparação entre as duas galerias a fim de determinar qual delas representa a melhor escolha.

5.3 Cenário 2 – Reservatório Jardim Botânico

Os resultados da simulação do Cenário 2 são apresentados na Figura 75, que ilustra a extensão da mancha de inundação para essa configuração específica. Além disso, na Figura 76 é apresentada a representação da lâmina d'água nesse mesmo cenário.

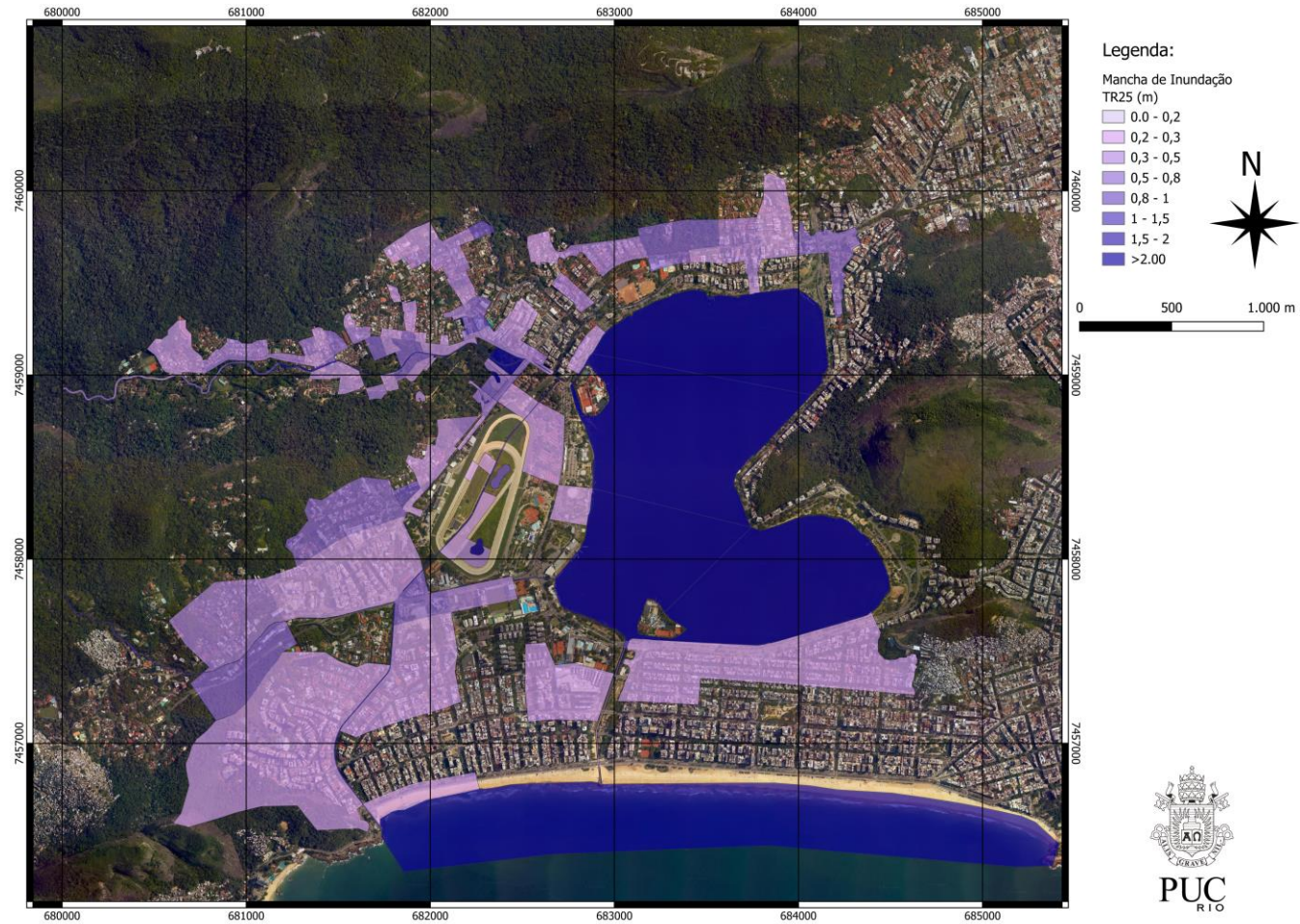


Figura 75 - Mancha de inundação do Cenário 2.

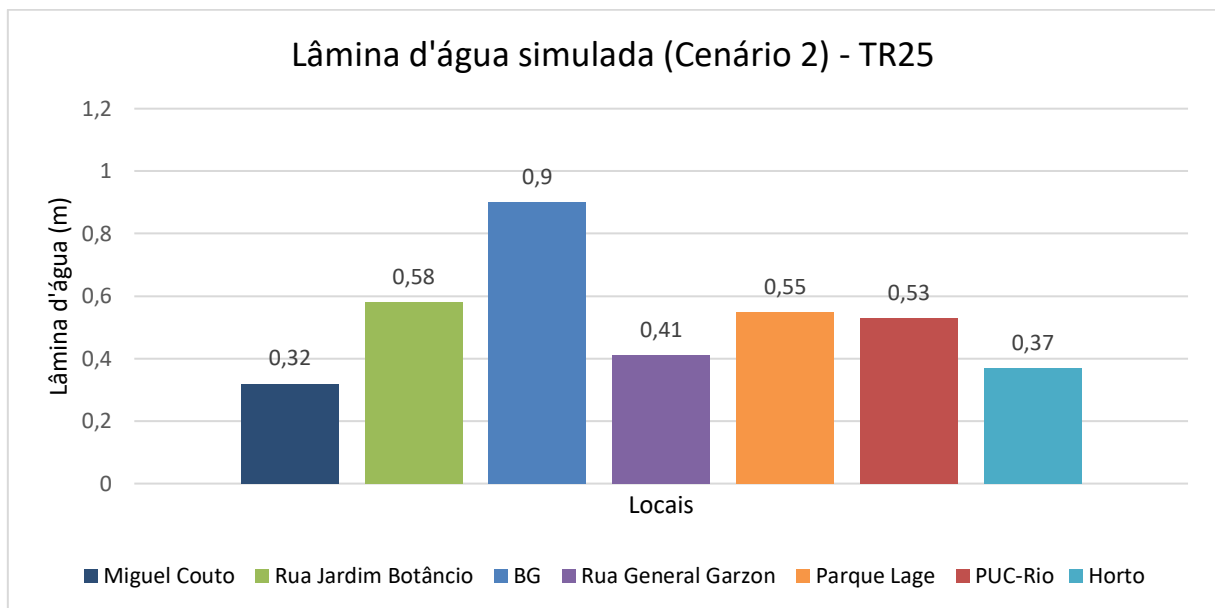


Figura 76 - Lâmina d'água simulada no Cenário 2.

Ao comparar o Cenário 2 com o Cenário 0, é possível constatar uma redução significativa na lâmina d'água em determinadas áreas, como a Rua Jardim Botânico e a Rua General Garzón. Nesse cenário, foi implementado um reservatório de 30.000 m³ no interior do Jardim Botânico, juntamente com as medidas propostas no cenário 1. Essa intervenção resultou em uma redução de 42,5% na lâmina d'água na Rua Jardim Botânico e de 50,6% na Rua General Garzón, demonstrando um resultado bastante otimista.

Na Figura 77 e 78 apresenta o perfil de níveis d'água máximos no Rio dos Macacos e Canal do Jóquei do cenário 0 e Cenário 2.

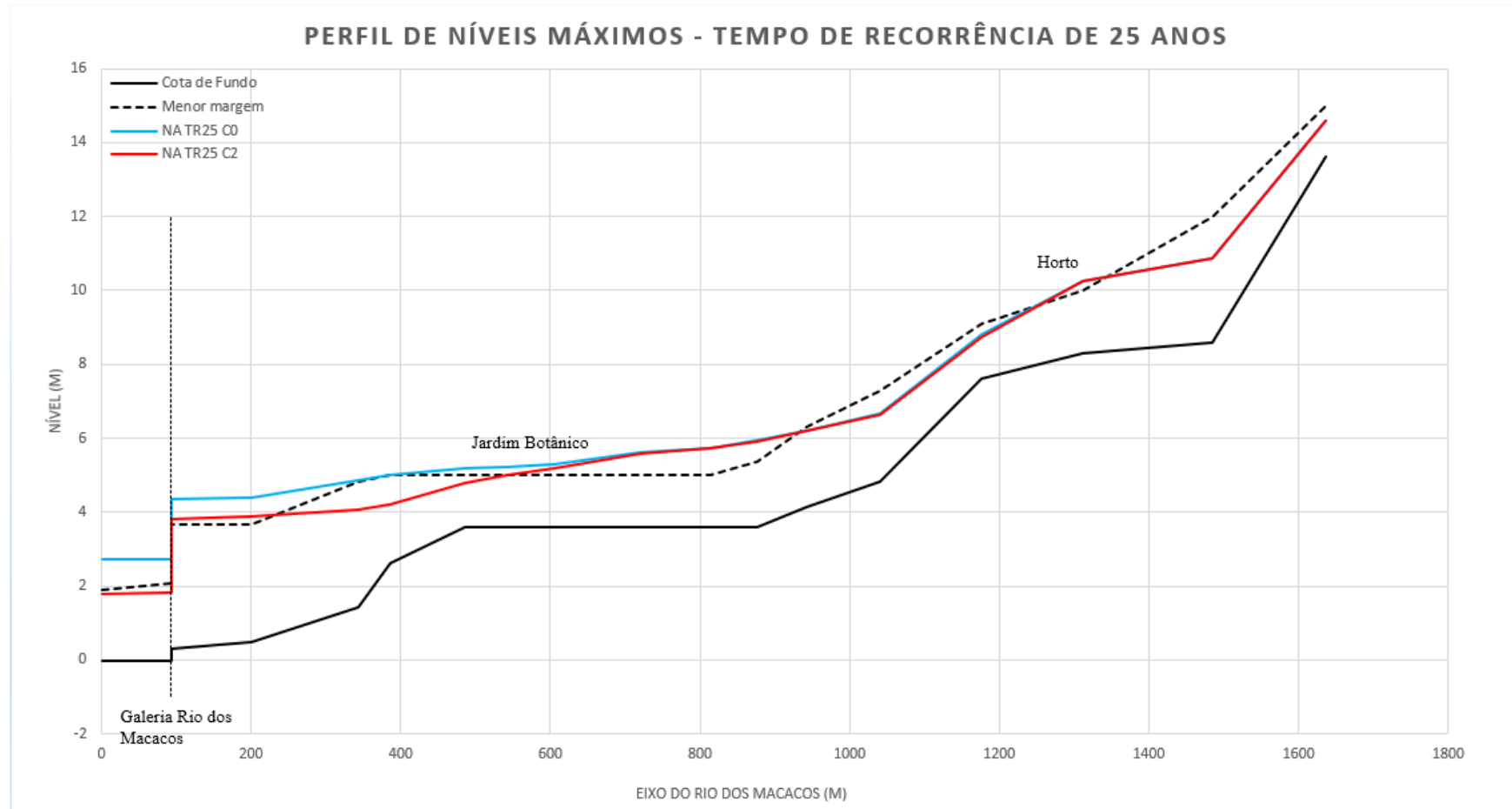


Figura 77 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para o Cenário 0 e Cenário 2.

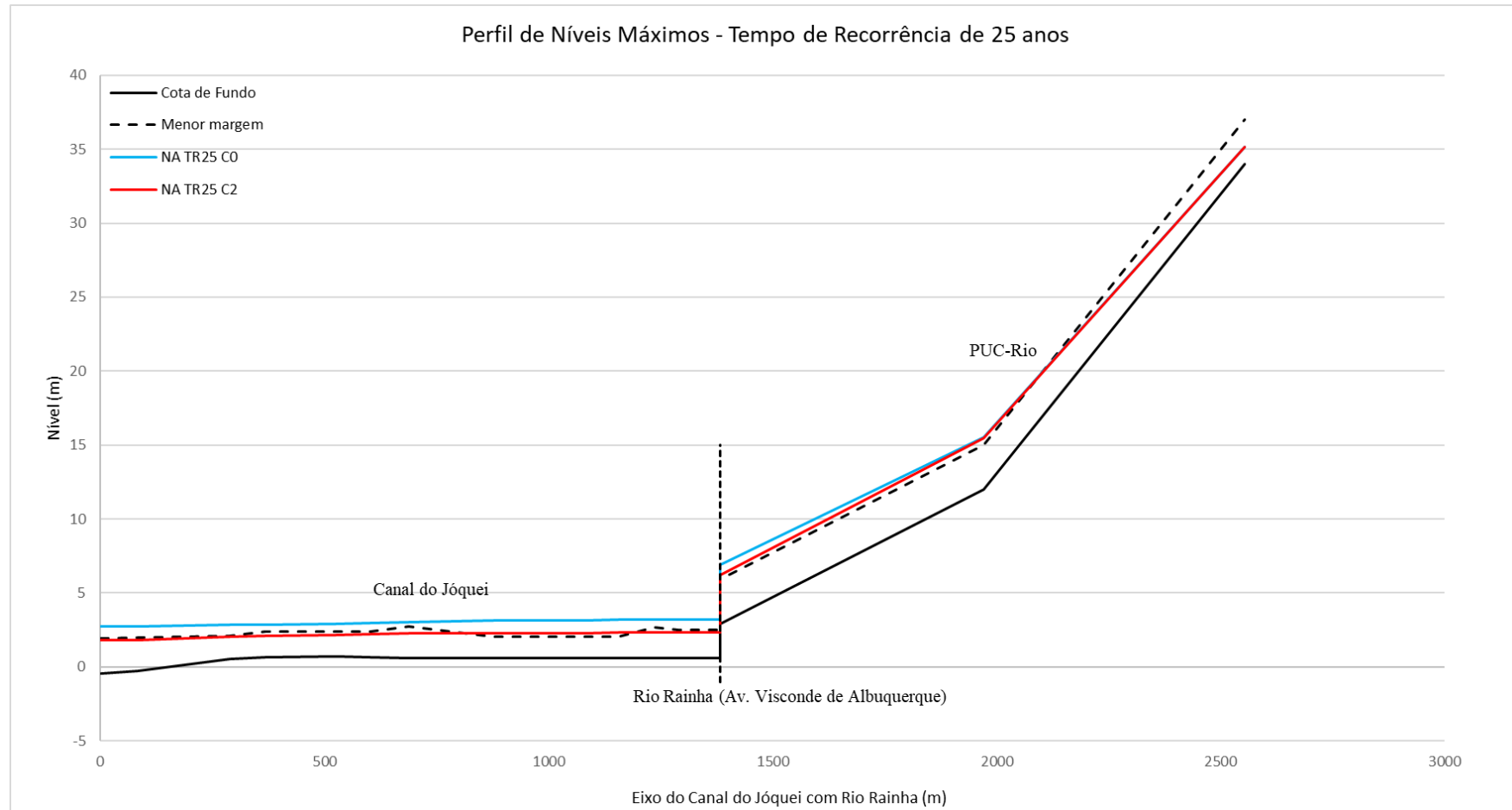


Figura 78 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para o Cenário 0 e Cenário 2.



A Figura 79 exibe a análise comparativa das galerias mencionada no final do capítulo 5.2. Observa-se que a proposta de galeria proposta por Miguez *et al.* (2012) demonstra resultados significativos nas Ruas Jardim Botânico e General Garzón. Portanto, neste cenário, a solução proposta por Miguez *et al.* (2012) mostra-se mais eficaz. No entanto, será realizada uma nova comparação nos resultados do cenário 4 para verificar se essa conclusão se mantém.

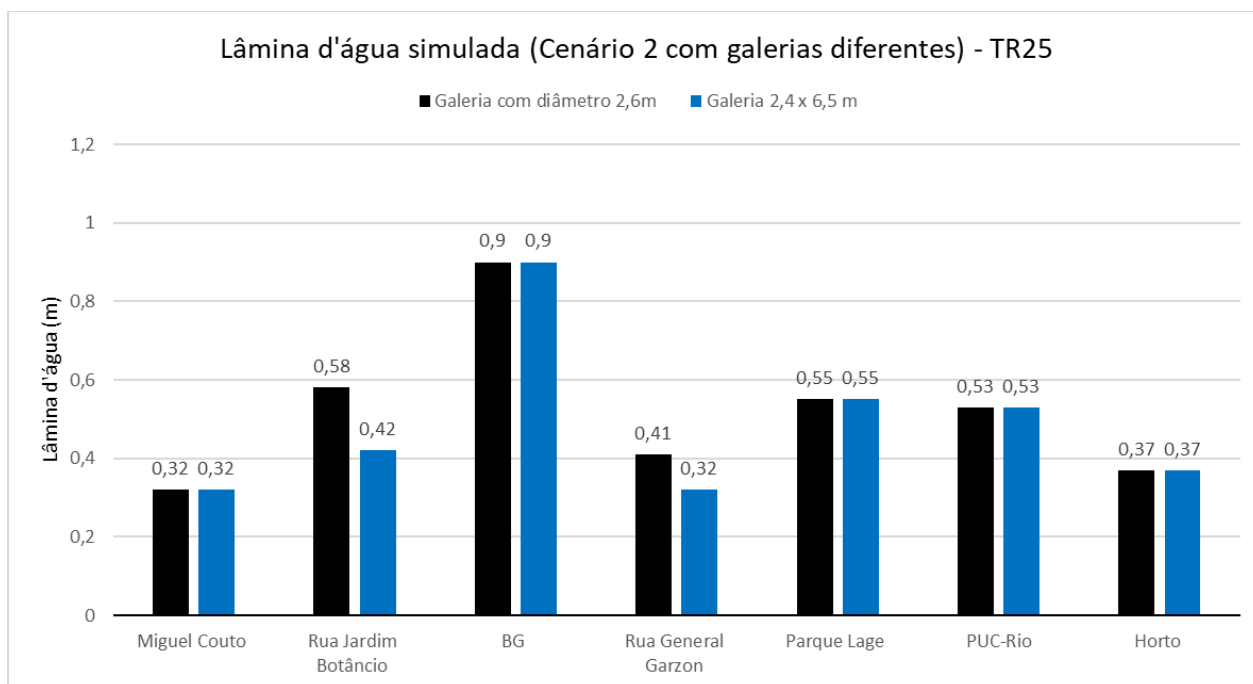


Figura 79 - Comparação de lâmina d'água para galerias diferentes no Cenário 2.

5.4 Cenário 3 – Reservatórios de Encosta

Os resultados da simulação do Cenário 3 são apresentados na Figura 80 através da mancha de inundação para a situação do cenário. Além disso, na figura 81 está representado a lâmina d'água neste cenário.

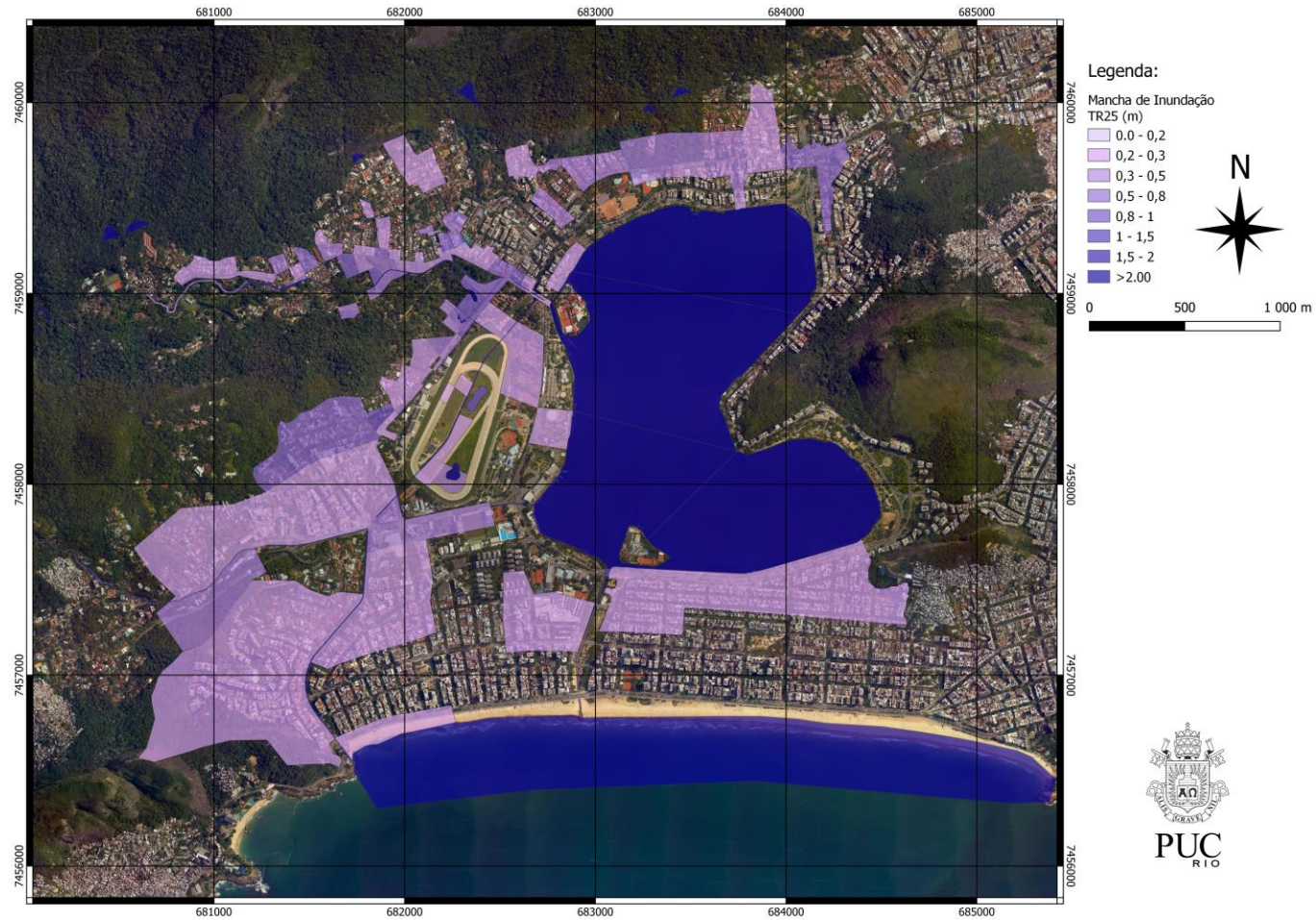


Figura 80 - Mancha de inundação do Cenário 3.

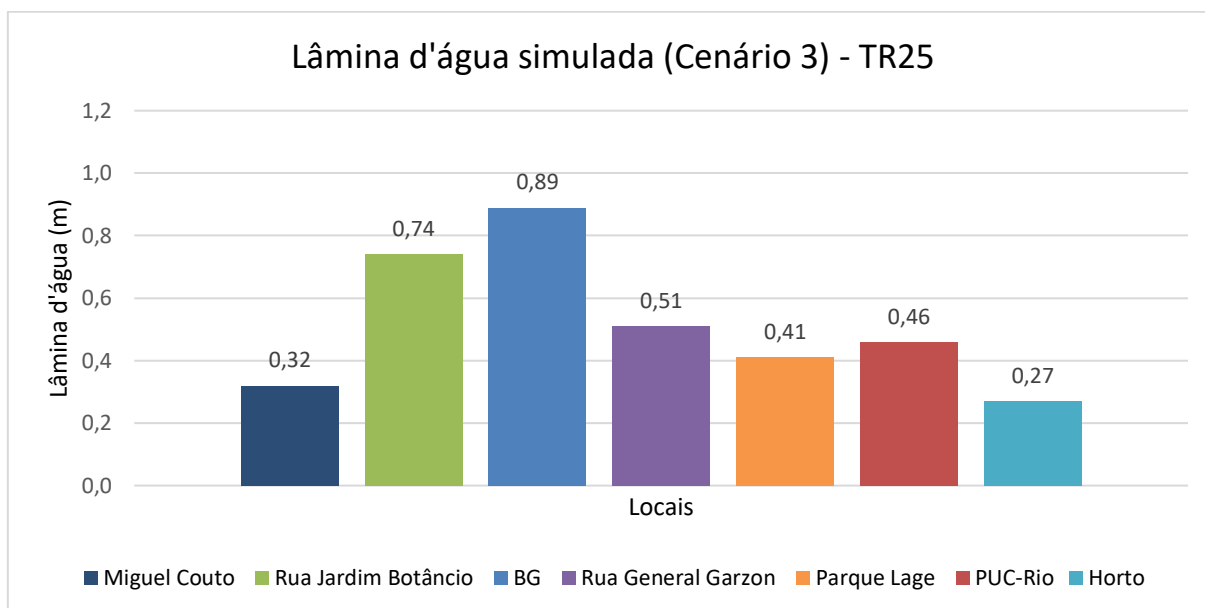


Figura 81 - Lâmina d'água simulada no Cenário 3.

Ao comparar o Cenário 3 com o Cenário 0 (situação atual), é evidente uma redução significativa na lâmina d'água em todas as áreas representadas na Figura 81. Neste cenário, foram implantados nove reservatórios nas encostas da Bacia do Rio dos Macacos, em conjunto com as medidas propostas no cenário 1. Como resultado dessas intervenções, verificou-se uma redução na lâmina d'água de 38,5% na Rua General Garzón, 27% no Horto, 26,7% na Rua Jardim Botânico e no Parque Lage, 13% na PUC-Rio e 8% no Baixo Gávea (BG). Esses números demonstram a eficácia dessas ações no controle e mitigação dos problemas relacionados ao acúmulo de água durante eventos de chuva.

Na Figura 82 e 83 apresenta o perfil de níveis d'água máximos no Rio dos Macacos e Canal do Jóquei do Cenário 0 e Cenário 3.



PERFIL DE NÍVEIS MÁXIMOS - TEMPO DE RECORRÊNCIA DE 25 ANOS

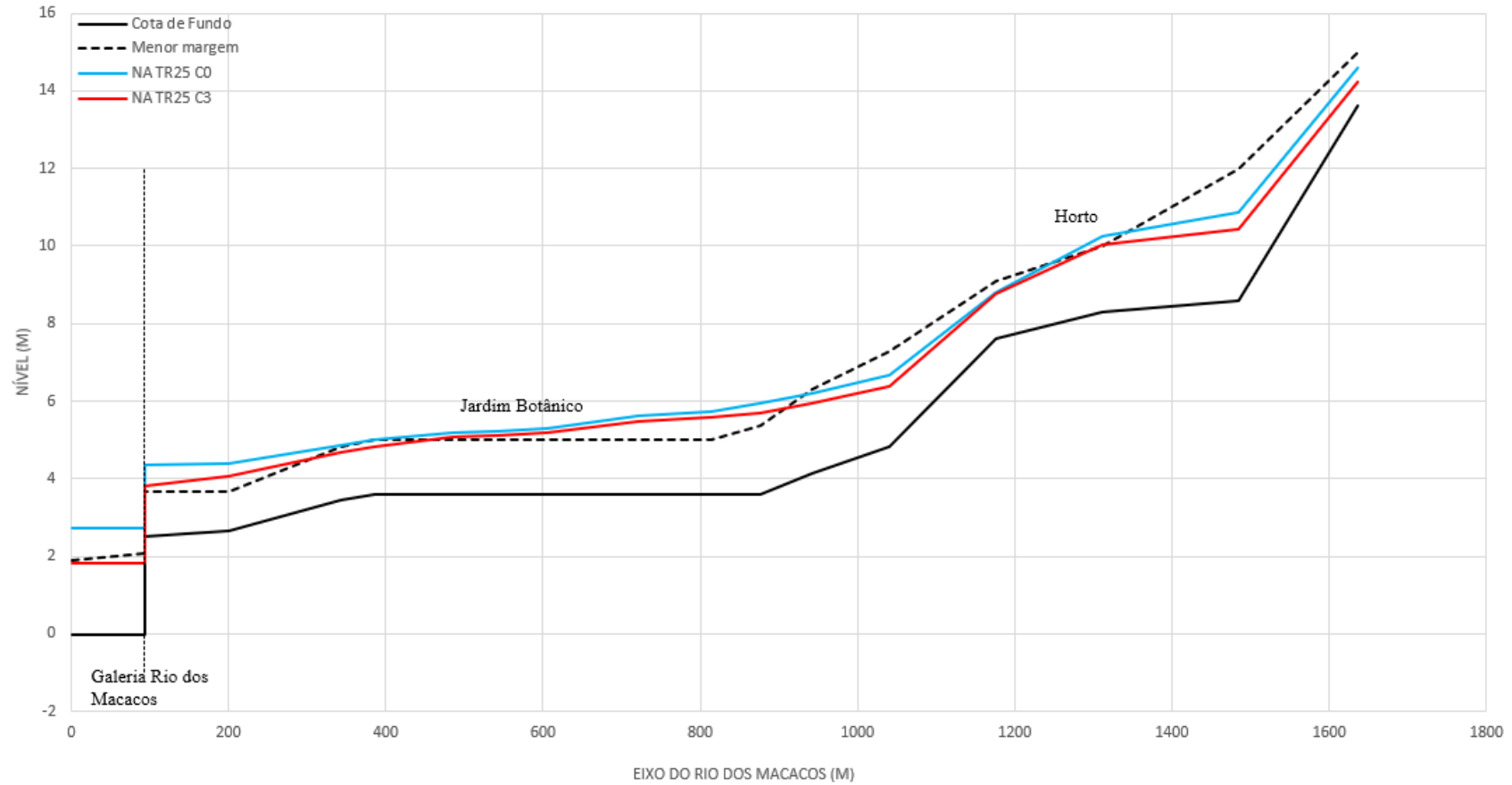


Figura 82 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para o Cenário 0 e Cenário 3.

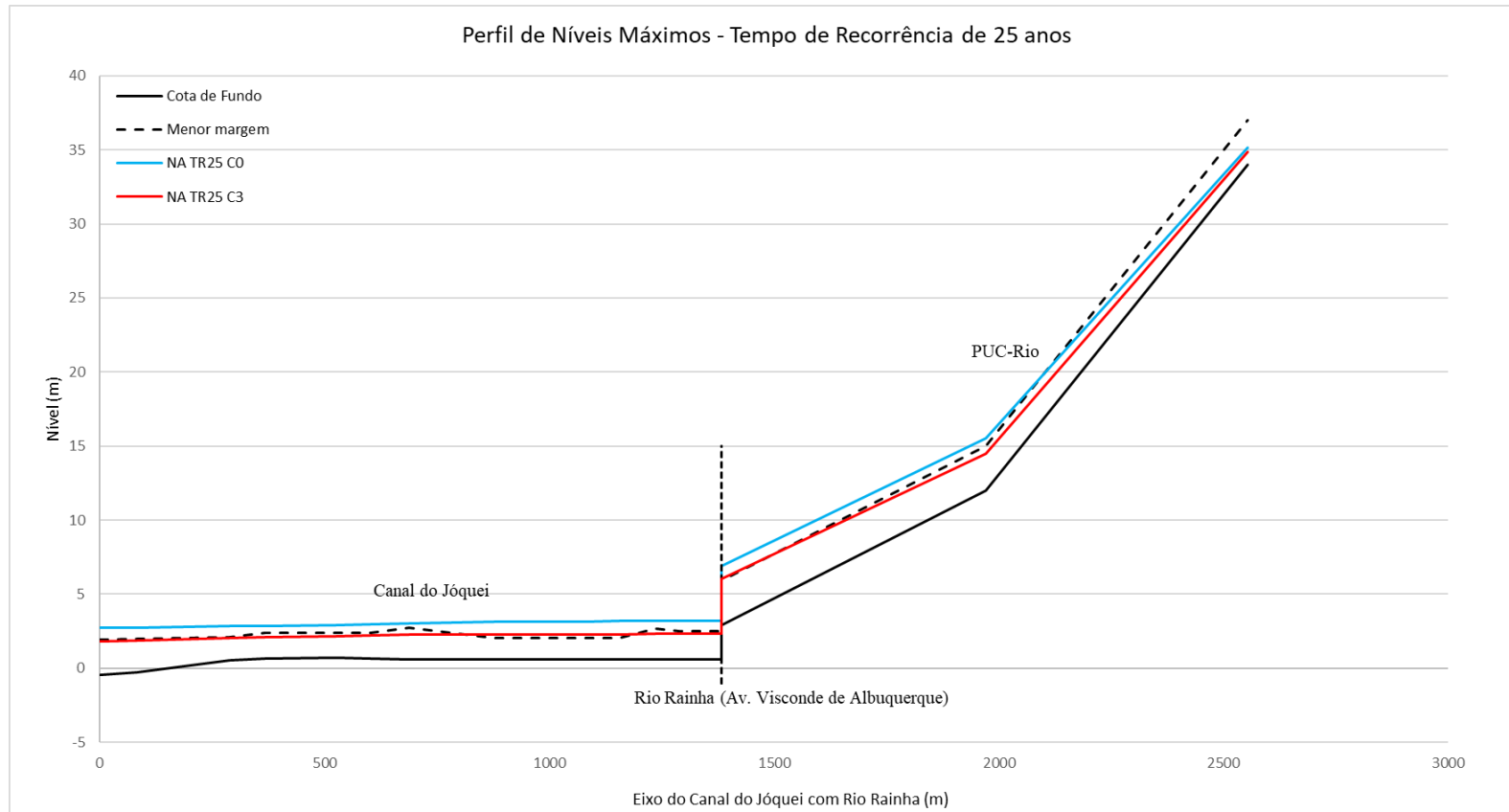


Figura 83 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para o Cenário 0 e Cenário 3.



Para avaliar a efetividade dos reservatórios de encosta, procedeu-se à comparação das vazões entre a situação atual (Cenário 0) e as condições após a implantação de cada reservatório. Essa análise comparativa pode ser visualizada nas Figuras 84 à 92. Essas figuras apresentam informações detalhadas sobre as vazões resultantes em cada ponto de monitoramento, fornecendo uma visão abrangente dos impactos desses reservatórios na mitigação dos fluxos de água durante eventos pluviais para jusante.

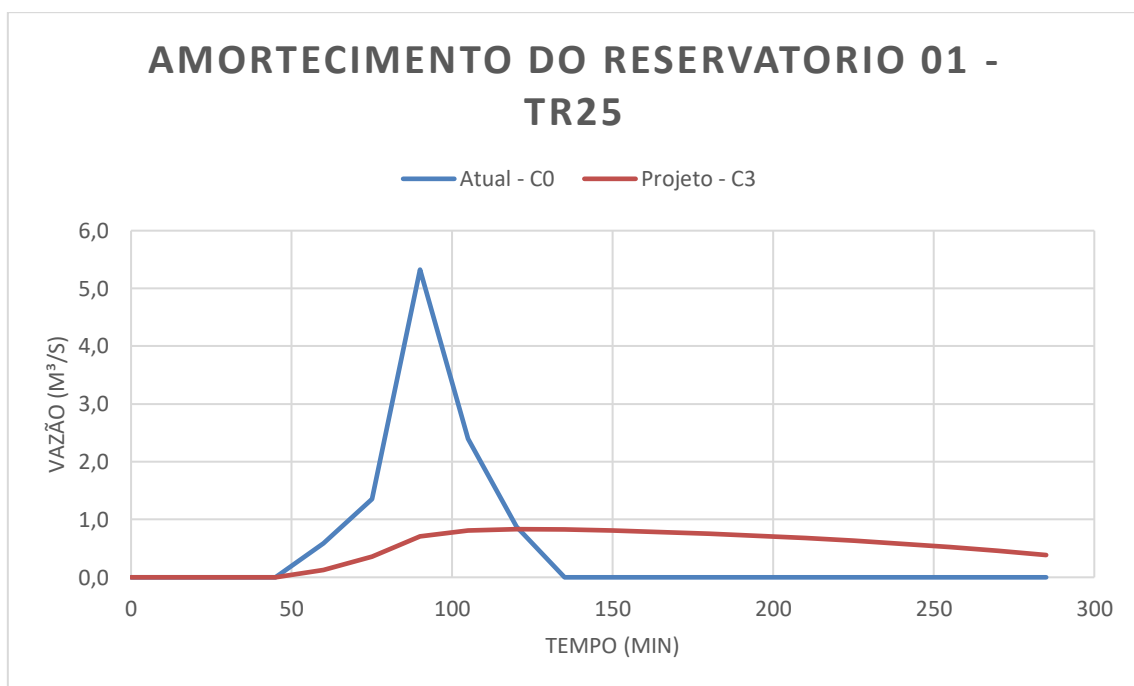


Figura 84 - Amortecimento do Reservatório 1.

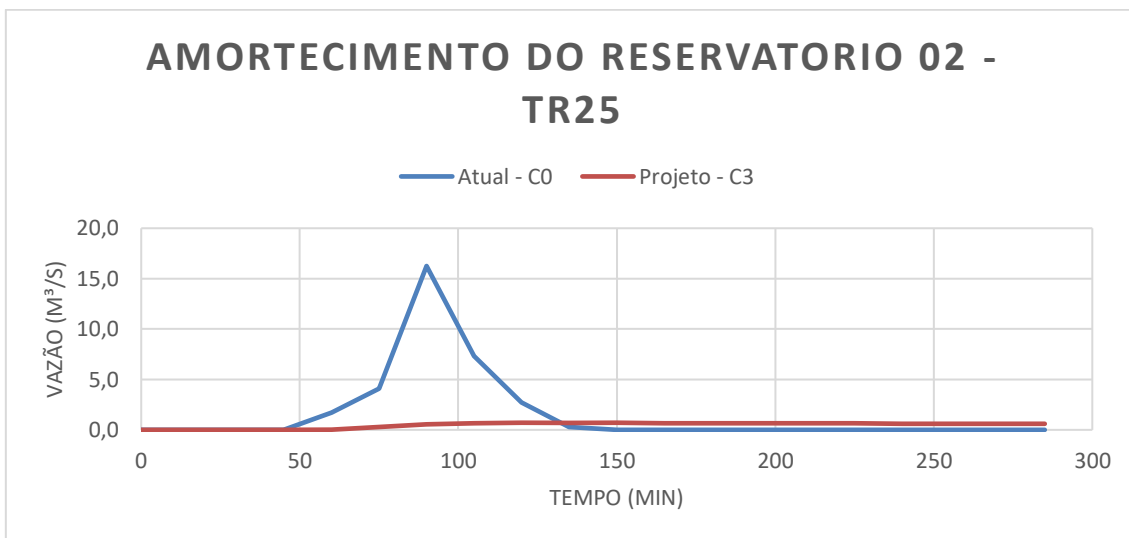


Figura 85 - Amortecimento do Reservatório 2.

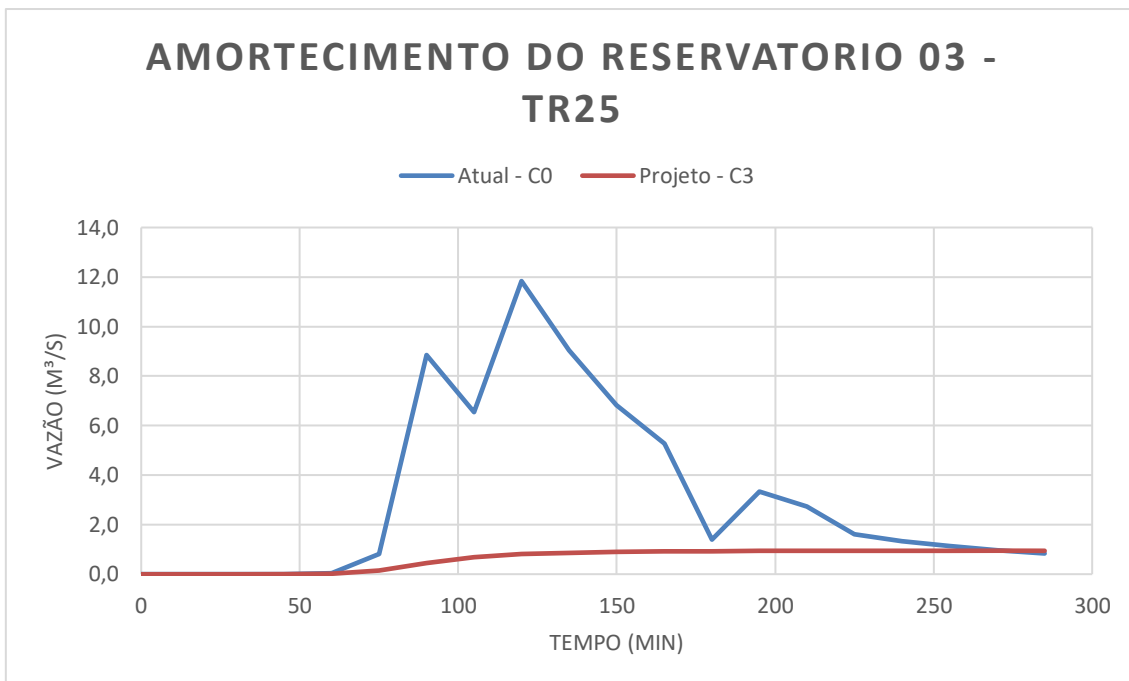


Figura 86 - Amortecimento do Reservatório 3.

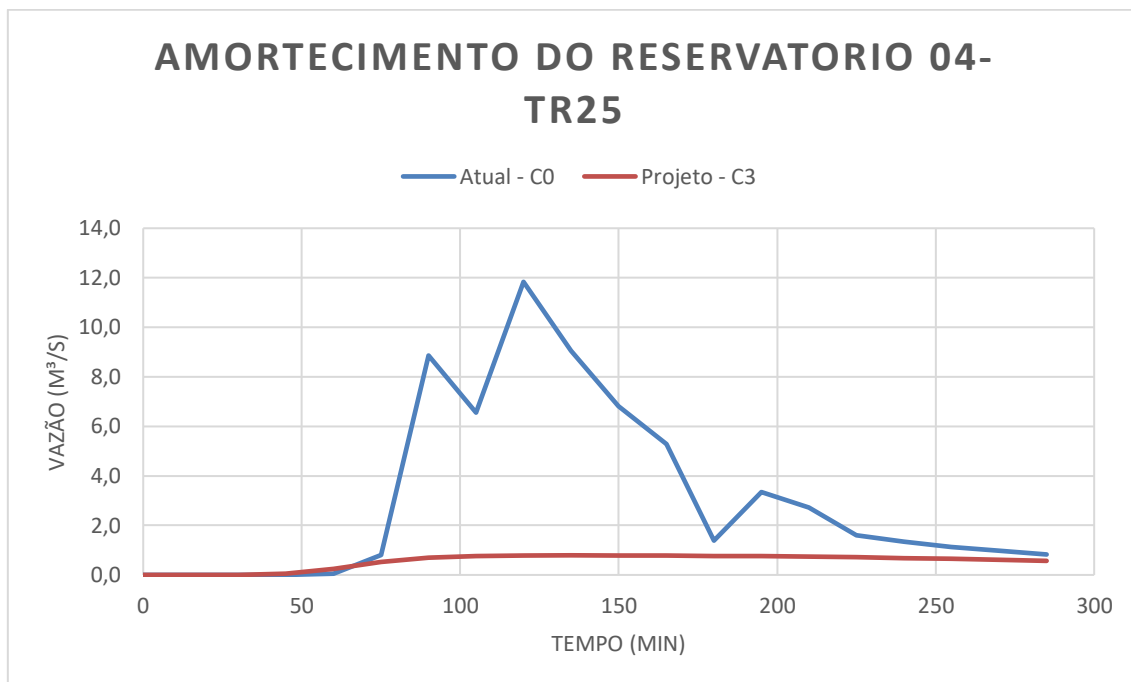


Figura 87 - Amortecimento do Reservatório 4.

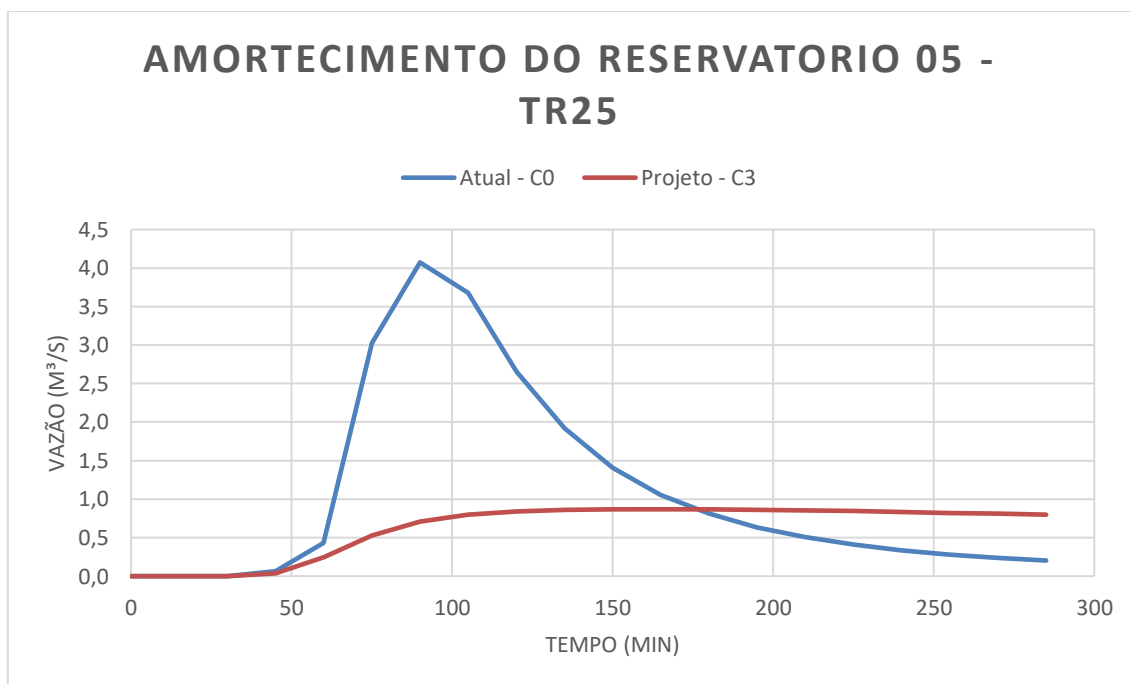


Figura 88 - Amortecimento do Reservatório 5.

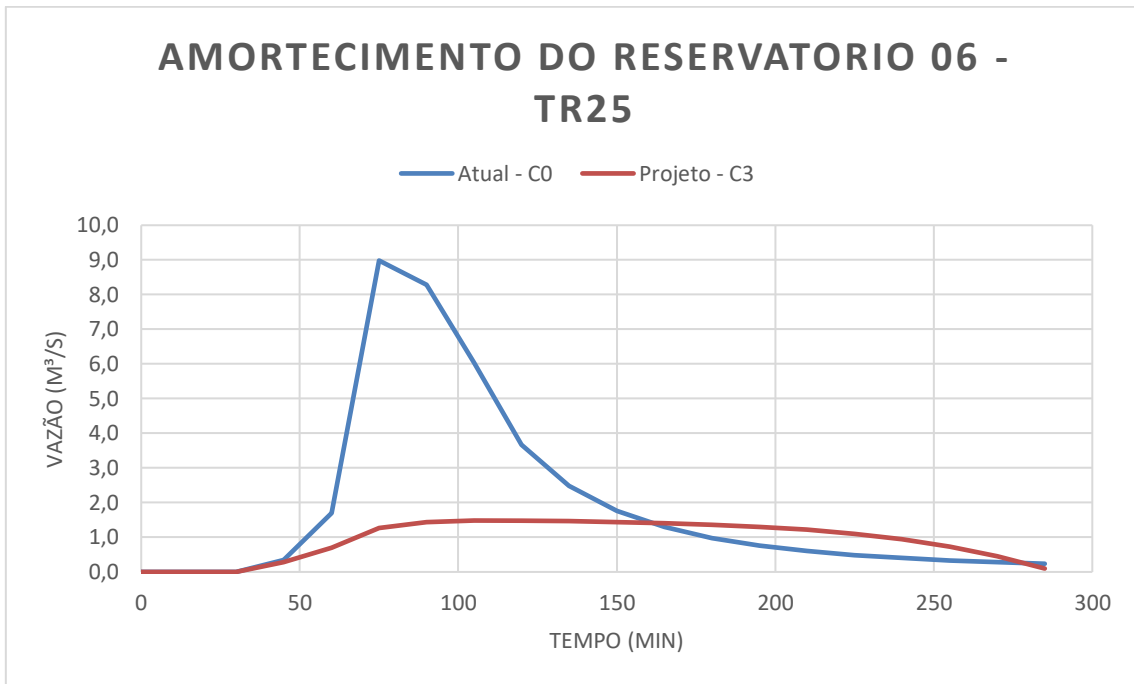


Figura 89 - Amortecimento do Reservatório 6.

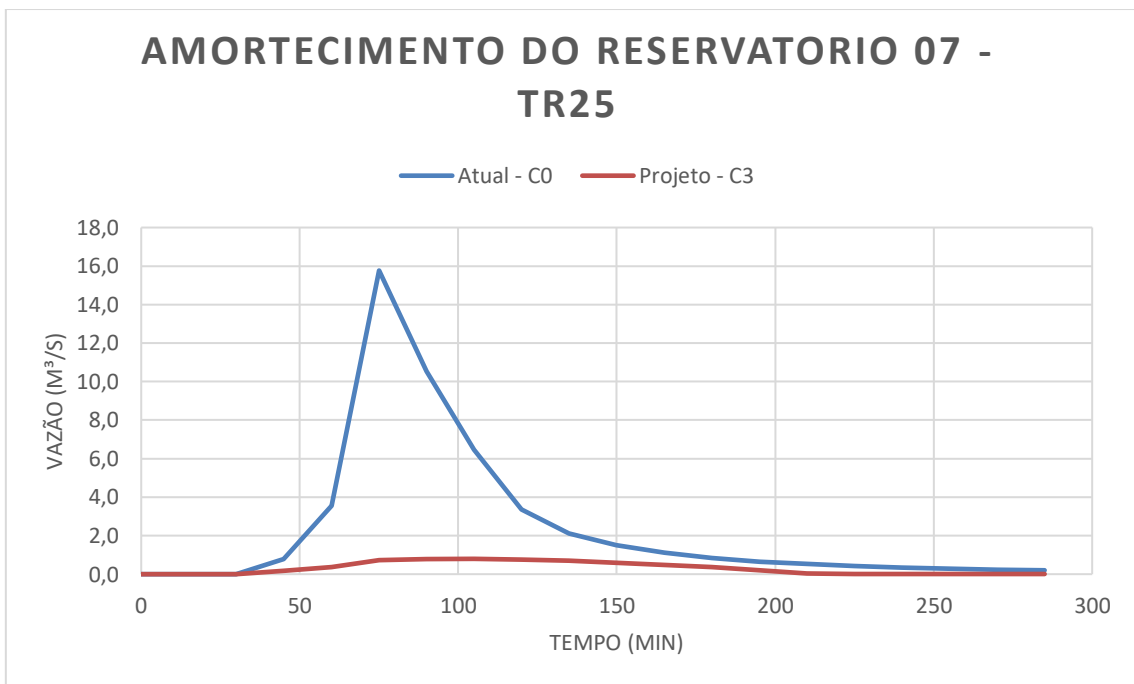


Figura 90 - Amortecimento do Reservatório 7.

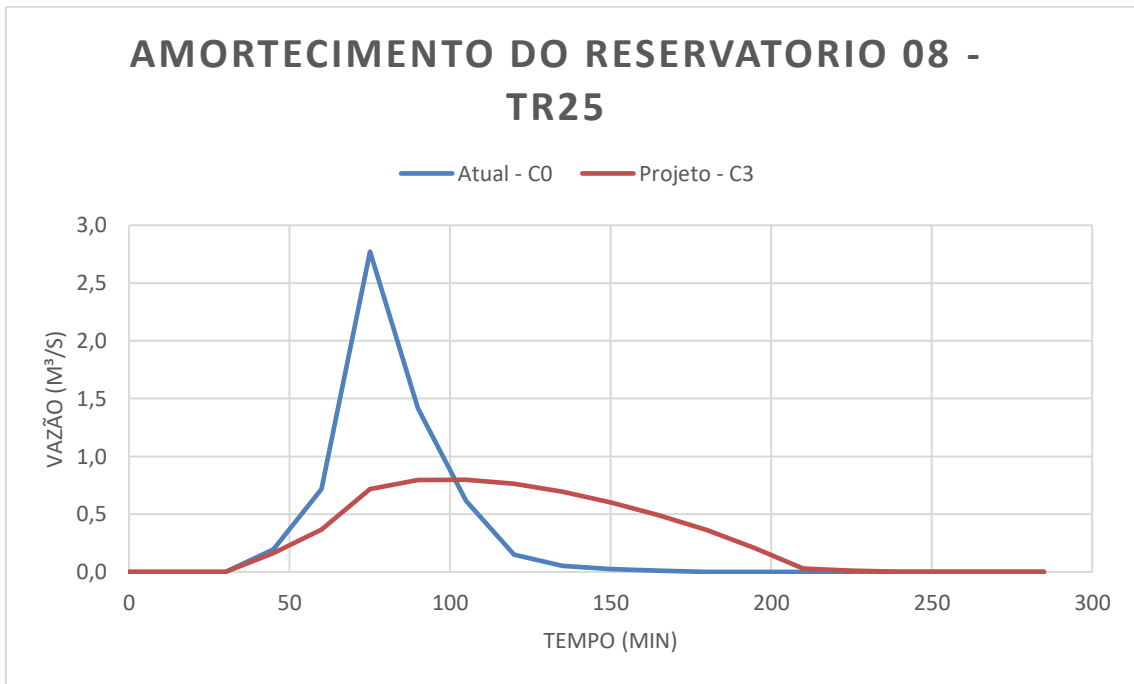


Figura 91 - Amortecimento do Reservatório 8.

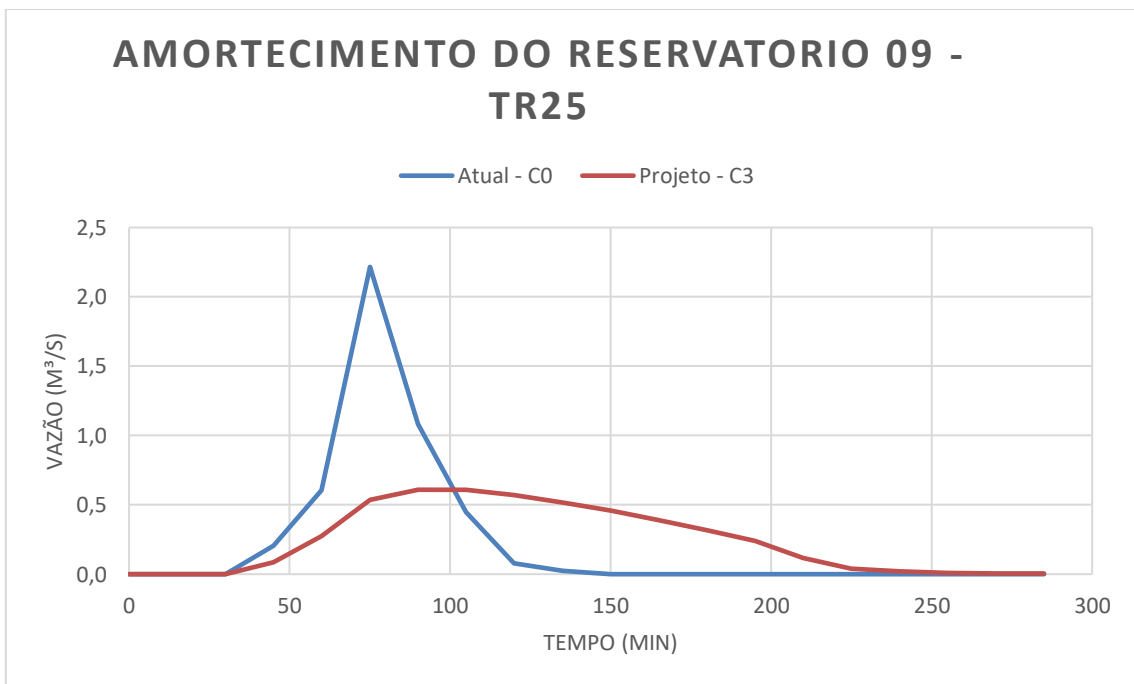


Figura 92 - Amortecimento do Reservatório 9.



Com base nas análises realizadas, podemos concluir que a implantação dos reservatórios foi efetiva na redução do pico de vazão observado no Cenário 0. Essa intervenção demonstrou ser uma estratégia eficaz para controlar e mitigar o escoamento máximo de água durante eventos pluviais. Os reservatórios desempenharam um papel fundamental na moderação do fluxo hídrico, proporcionando uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos na região em estudo.

5.5 Cenário 4 – Combinação dos cenários

Os resultados da simulação do Cenário 4 são apresentados na Figura 93 através da mancha de inundação para a situação do cenário.

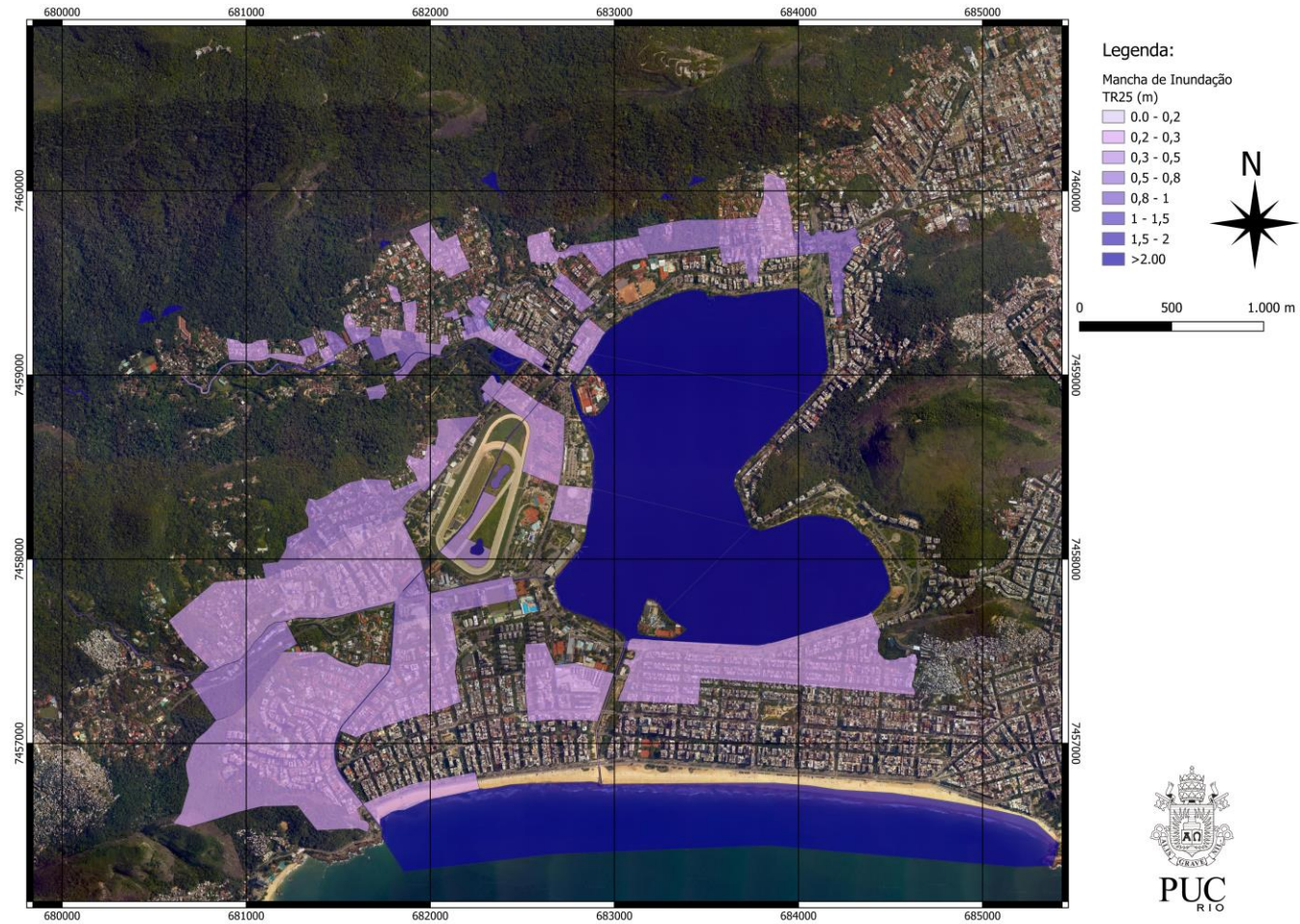


Figura 93 - Mancha de inundação do Cenário 4.



Neste cenário, ocorre a combinação dos Cenários 1, 2 e 3, resultando nos melhores resultados obtidos. No entanto, foi identificada a necessidade de implantar um sistema de microdrenagem (bocas de lobo) em algumas regiões, pois mesmo após as intervenções realizadas, esses locais ainda apresentavam ocorrência de inundação. A Figura 94 apresenta uma comparação entre esse cenário, tanto com a presença quanto com a ausência do sistema de microdrenagem, além de fazer uma comparação com a situação atual (Cenário 0).

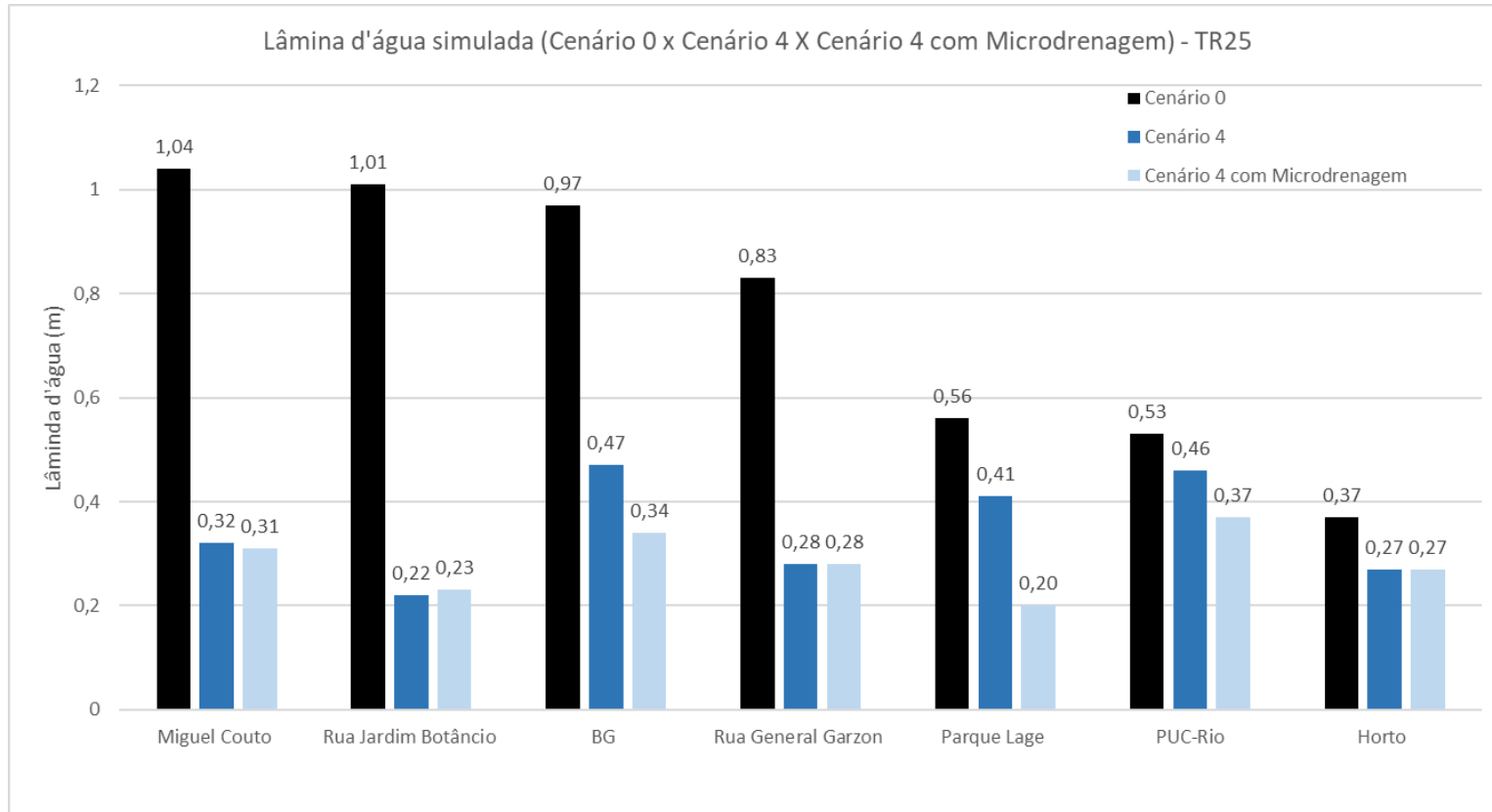


Figura 94 - Lâmina d'água simulada no cenário 4 com e sem microdrenagem.



Em comparação ao Cenário 0, todos os cenários apresentaram resultados significativos. No entanto, as regiões do Baixo Gávea (BG), PUC-Rio e Parque Lage ainda apresentaram níveis de lâmina d'água elevados. Após a implementação do sistema de microdrenagem, foram obtidos os resultados para a bacia estudada. É importante destacar que a única região que registrou um aumento na lâmina d'água após a implantação das bocas de lobo foi a Rua Jardim Botânico, com um acréscimo de 1 cm. Essa variação não é considerada significativa, pois as regiões que receberam intervenções obtiveram resultados muito promissores.

Na Figura 95 e 96 apresenta o perfil de níveis d'água máximos no Rio dos Macacos e Canal do Jóquei de todos os cenários.

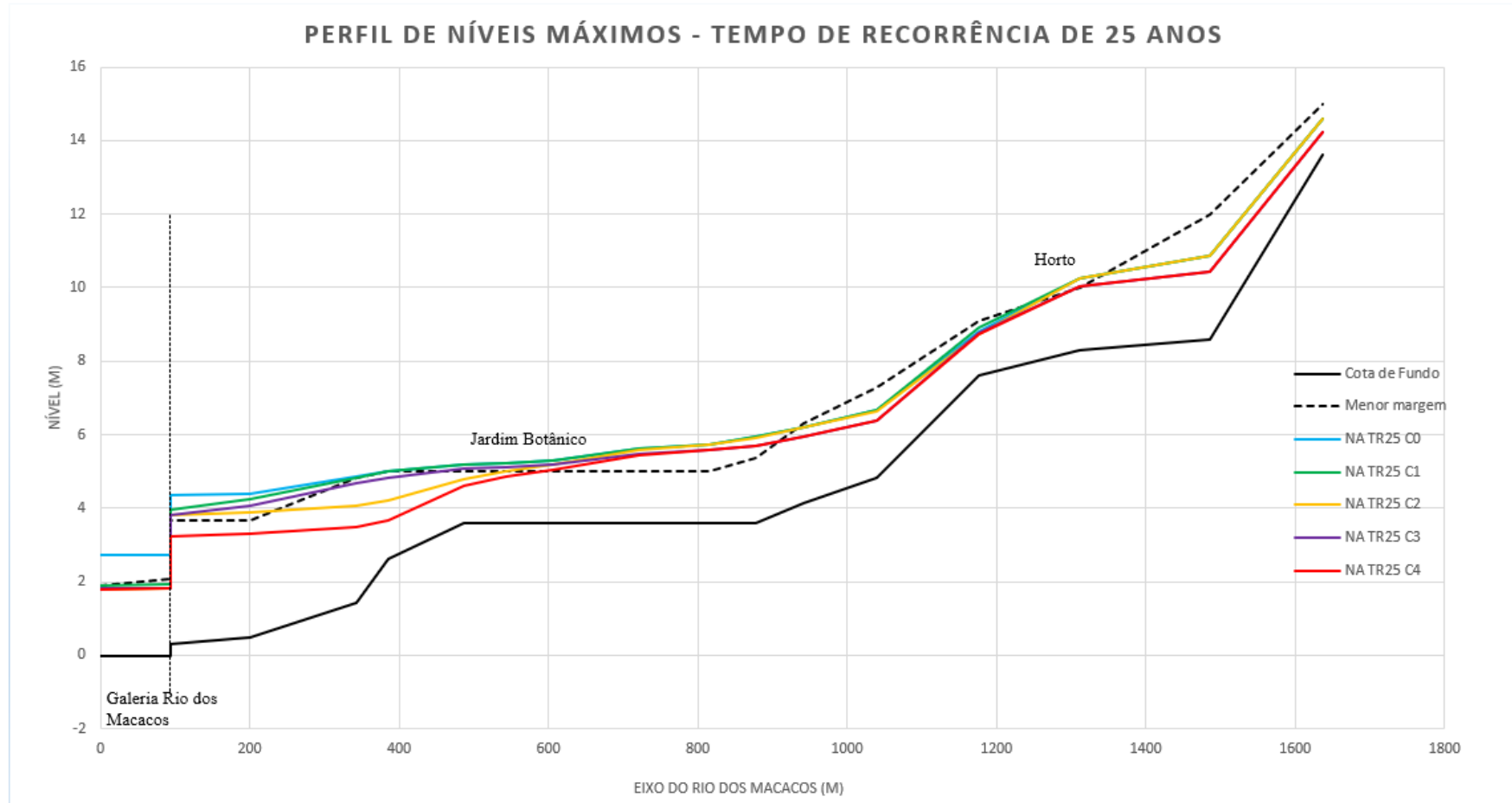


Figura 95 - Perfil de níveis máximos do Rio dos Macacos para todos os cenários.

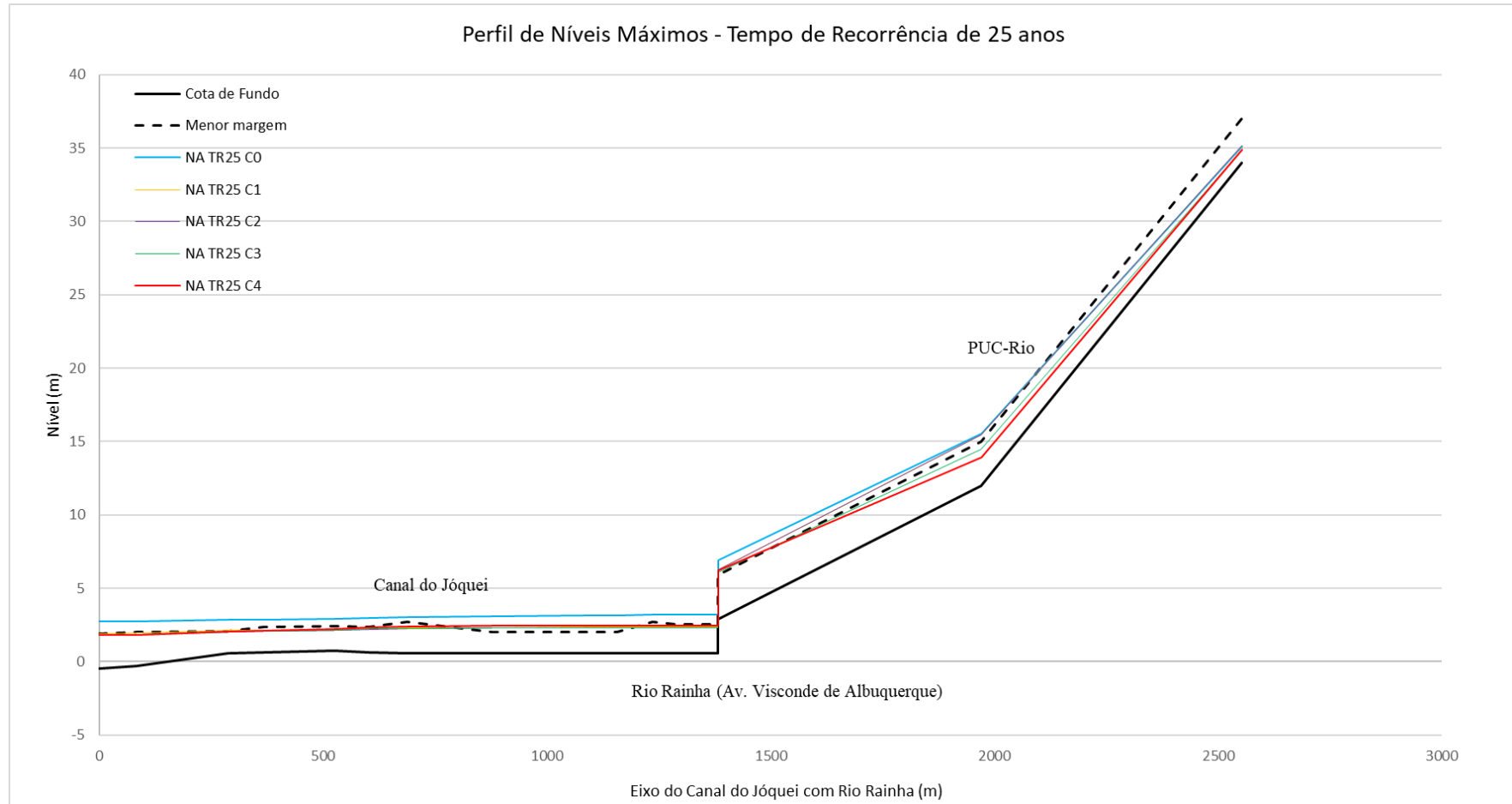


Figura 96 - Perfil de níveis máximos no Canal do Jóquei e Rio Rainha para todos os cenários.



A Figura 97 apresenta uma análise comparativa das galerias mencionadas ao final do capítulo 5.2. Verifica-se que a proposta de galeria elaborada por Miguez *et al.* (2012) não demonstrou resultados significativos no Cenário 4. Esse resultado pode ter sido influenciado pelas outras intervenções realizadas nesse cenário. Na Rua Jardim Botânico, a lâmina d'água da galeria proposta por Miguez *et al.* (2012) ficou apenas 1 cm abaixo da galeria com diâmetro de 2,6 metros. Já na região do Hospital Miguel Couto, a galeria de 2,6 metros obteve uma redução de apenas 1 cm em comparação à outra proposta. Ambos os resultados não são considerados relevantes em termos práticos. Diante disso, considerando os aspectos econômicos e construtivos, a galeria com diâmetro de 2,6 metros mostra-se mais viável em comparação à galeria de 2,4 x 6,5 metros. Por fim, é possível observar na Tabela 17 o resumo de resultado do percentual de redução da lâmina d'água comparados com o Cenário 0.

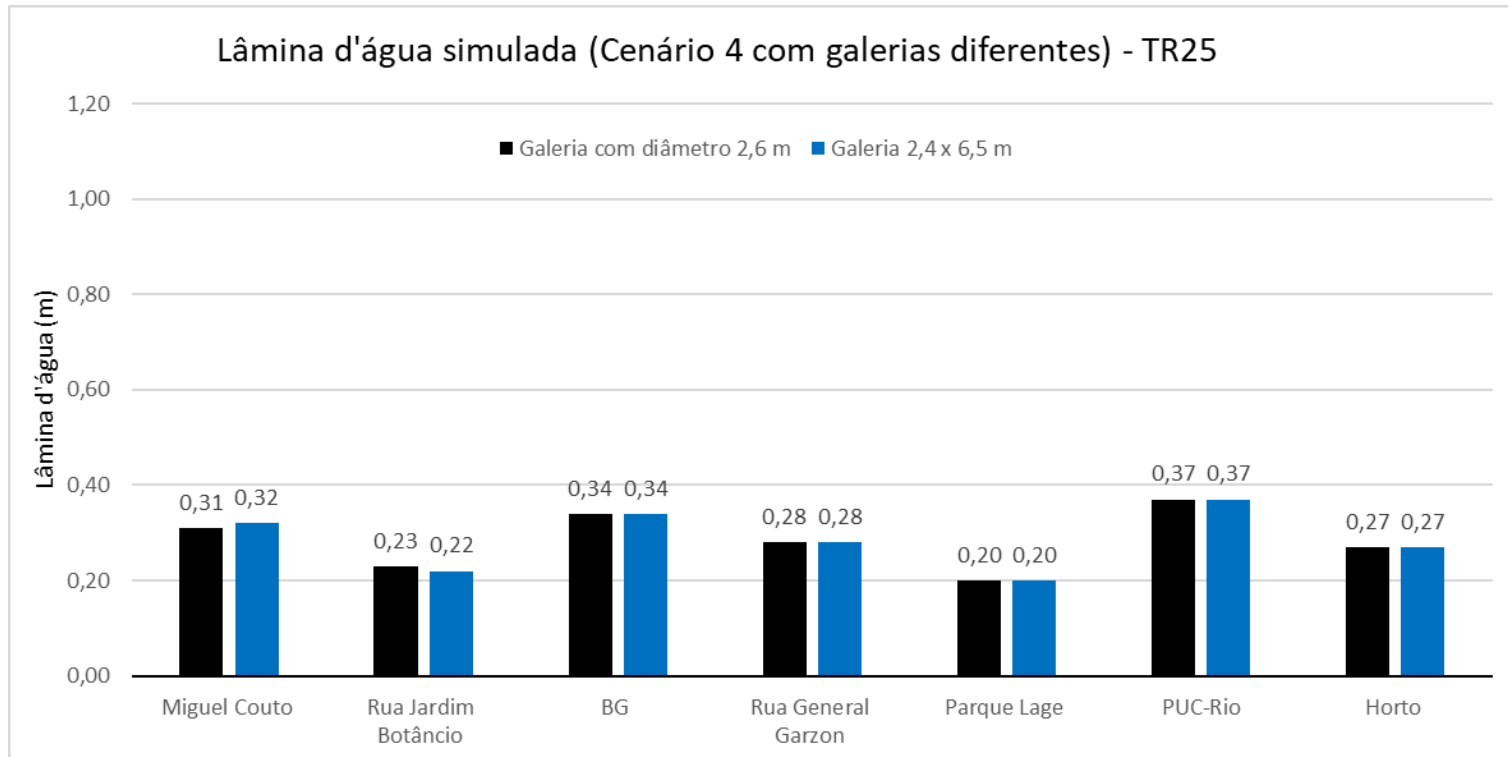


Figura 97 - Comparação de lâmina d'água para galerias diferentes no Cenário 4.

Tabela 17 - Resumo de resultados.

Cenários	Percentual de Redução da Lâmina em relação ao cenário 0 (Situação Atual)						
	Miguel Couto	Rua Jardim Botânico	Baixo Gávea(BG)	Rua General Garzón	Parque Lage	PUC-Rio	Horto
Cenário 1	69,23%	10,89%	7,22%	15,66%	1,79%	0,00%	0,00%
Cenário 2	69,23%	42,57%	7,22%	50,60%	1,79%	0,00%	0,00%
Cenário 3	69,23%	26,73%	8,25%	38,55%	26,79%	13,21%	27,03%
Cenário 4	70,19%	77,23%	64,95%	66,27%	64,29%	30,19%	27,03%

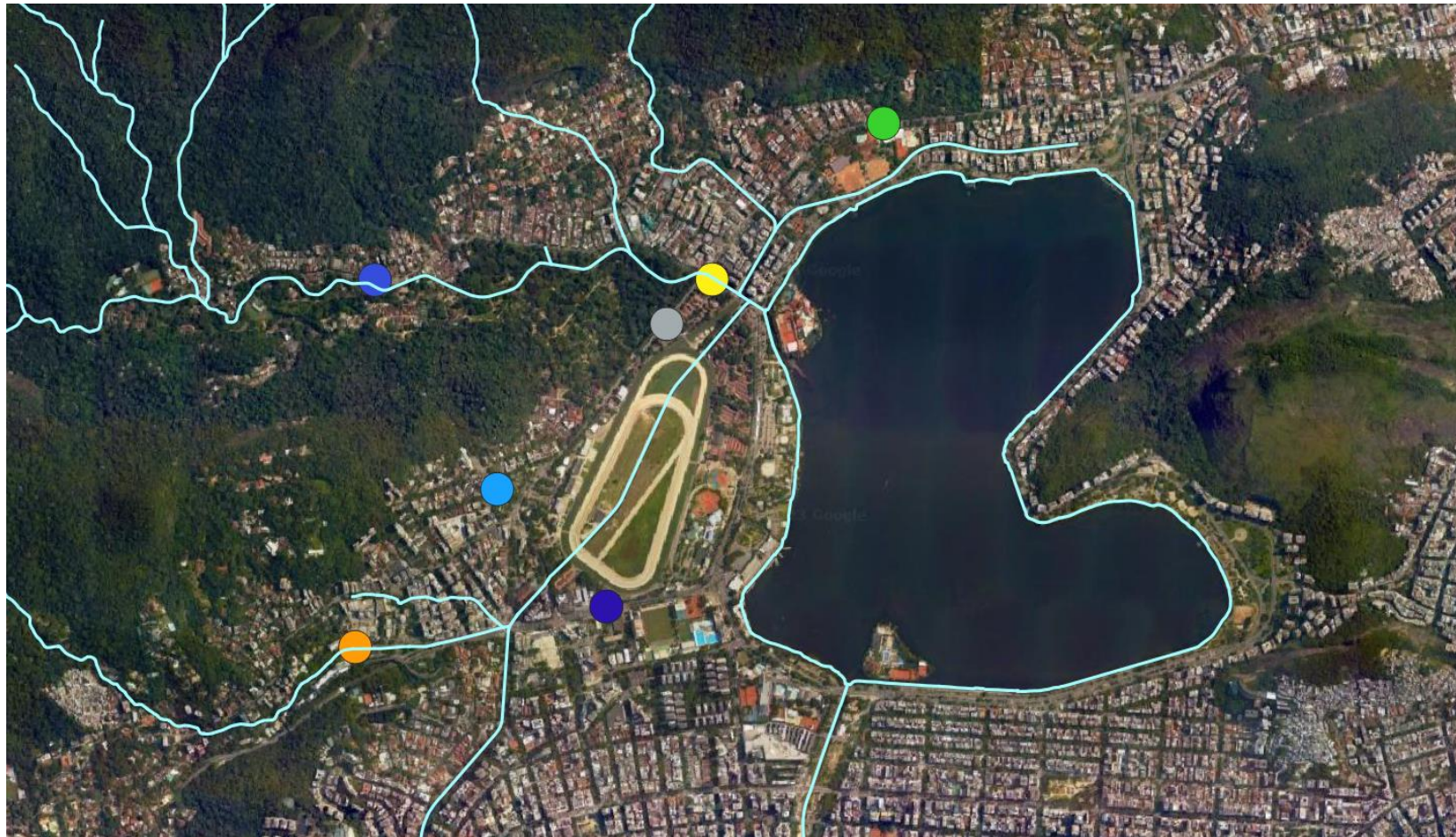


Figura 98 - Pontos referentes aos locais mais críticos (Tabela 17)



6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo consistiu em propor um projeto de mitigação de inundações na bacia hidrográfica do Rio dos Macacos, considerando quatro cenários com soluções estruturais para lidar com chuvas intensas com retorno de 25 anos, utilizadas para avaliar o desempenho do sistema de macrodrenagem. Nesse contexto, as presentes considerações finais apresentam uma análise dos aspectos favoráveis e desfavoráveis da implementação dessas soluções, bem como a avaliação da necessidade de adotar medidas não estruturais complementares.

As medidas propostas para a bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas, que incluem a ampliação da rede de drenagem no cruzamento entre as ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão, o fechamento da saída do Canal do Jóquei para o Rio dos Macacos, a abertura da comporta na Rua General Garzón, e a instalação de uma rede de drenagem na região do Hospital Miguel Couto, demonstraram resultados extremamente favoráveis no contexto da drenagem urbana. Entre os cenários propostos, o Cenário 1 se destacou pela significativa redução na lâmina d'água na Rua Mário Ribeiro (região do Hospital Miguel Couto), com uma diminuição de 69,23%. Embora as outras regiões não tenham apresentado uma redução tão expressiva na lâmina d'água, as demais intervenções previstas nesse cenário, como o fechamento do canal do Jóquei para impedir a entrada de águas poluídas provenientes do Rio Rainha na Lagoa, foram indispensáveis.

O Cenário 2 revela que a implementação de uma galeria de maior capacidade no trecho final do Rio dos Macacos, localizado sob a Rua Jardim Botânico, teria um efeito significativo na eliminação dos problemas de alagamento na região, resultando apenas em uma pequena lâmina de água residual associada à passagem da cheia. Além disso, outra solução considerada, que consiste na construção de um reservatório de retenção inicialmente proposto dentro do Parque Jardim Botânico, também se mostrou eficaz no controle das enchentes.



Essa medida resultou em reduções notáveis nos níveis de água, com diminuição de 42,57% ao longo da Rua Jardim Botânico e 50,60% no cruzamento com a Rua General Garzón, que anteriormente apresentava os piores casos de inundação na região.

A medida de ampliação da galeria resultou em um aumento no fluxo de água na direção a jusante. Portanto, no Cenário 1, mesmo com a abertura da comporta, não foi observada uma redução expressiva na lâmina d'água da Rua General Garzón. No entanto, no Cenário 3, a implantação de reservatórios distribuídos ao longo das encostas contribuiu para a capacidade de amortecimento, resultando em uma redução da vazão. Como consequência, o percentual de redução da lâmina d'água na Rua General Garzón, que era de 15,66% no Cenário 1, aumentou para 38,55% no Cenário 3. Essa abordagem de utilização de reservatórios foi analisada levando em consideração a inclinação do terreno na região. A área do Horto, situada em uma posição mais elevada na bacia, obteve benefícios com a instalação desses reservatórios, com uma redução de 27,03% na lâmina d'água.

É fundamental conduzir uma análise abrangente e detalhada ao considerar a implementação dos reservatórios, tanto aqueles localizados nas encostas quanto o do Jardim Botânico, levando em conta não apenas os aspectos econômicos, mas também a relevância do parque e a preservação do meio ambiente. Essa avaliação deve contemplar cuidadosamente os impactos potenciais das intervenções propostas, considerando a integridade do ecossistema do parque, a manutenção do seu valor paisagístico e a qualidade de vida das comunidades envolvidas. A discussão acerca dessas medidas deve envolver especialistas em meio ambiente, urbanistas, autoridades responsáveis e membros da sociedade civil, a fim de garantir uma tomada de decisão consciente e sustentável, que balanceie os benefícios da mitigação das inundações com a preservação do patrimônio natural e cultural do local.



Desta forma, a adoção de soluções estruturais para o controle de inundações desempenha um papel crucial na mitigação desses eventos. No entanto, é importante destacar que o uso exclusivo dessas medidas não exclui a necessidade de implementar abordagens não estruturais. É essencial contar com a atuação de órgãos responsáveis pelo monitoramento de áreas propensas a inundações, a utilização de sistemas de alerta de chuvas, especialmente em comunidades vulneráveis, a implementação de programas voltados para a conscientização ambiental da população local, o acompanhamento do uso e ocupação do solo, bem como a continuidade dos estudos relacionados ao manejo das águas pluviais e à drenagem urbana.

Ao adotar uma abordagem abrangente que combina medidas estruturais e não estruturais, é possível alcançar resultados mais eficazes na redução dos impactos das inundações. A integração dessas abordagens contribui para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos, promovendo a resiliência das comunidades e minimizando os danos causados por eventos climáticos extremos, no entanto, ainda existe a possibilidade de ocorrência de inundações na região, considerando o período de retorno de 25 anos, e isso evidencia que a topografia da região apresenta uma grande predisposição para ocorrência de inundações. Portanto, é fundamental investir em estratégias multidisciplinares e contínuas, buscando o aprimoramento constante das práticas de manejo de águas pluviais e a adaptação às mudanças climáticas, visando a segurança e o bem-estar das áreas urbanas afetadas.



Como recomendações para trabalhos futuros e prosseguimento da pesquisa, sugere-se o aprofundamento nos seguintes temas:

- Avaliação das alternativas propostas para os TRs de 50 e 100 anos;
- Estudo de viabilidade econômica das soluções propostas;
- Realização da simulação da microdrenagem para análise e otimização do sistema de drenagem urbana;
- Implementação de um sistema com soluções baseadas na natureza;
- Avaliação geotécnica e ambiental das soluções propostas;
- Simulação de um modelo considerando a influência das marés na altura do nível da Lagoa Rodrigo de Freitas;
- Desenvolvimento de soluções complementares para mitigar inundações remanescentes na bacia hidrográfica;
- Implantação de um reservatório de retenção no interior do Jockey Club Brasileiro.



7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. Projeto Técnico: Reservatórios de Detenção. São Paulo: Soluções Para Cidades, 2013. Disponível em: <http://solucoesparacidades.com.br/saneamento/reservatorios-de-detencao/>.

Acesso em: 23 jun. 2023.

Agência Brasil. Medição mostra que estado do Rio só tem 30,7% de Mata Atlântica. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-05/medicao-mostra-que-estado-do-rio-so-tem-307-de-mata-atlantica>>. Acesso em: 13 abr. 2023.

ARGUE, J. R.; PEZZANITI, D. Catchment “greening” using stormwater in Adelaide, South Australia. *Water Science and Technology*. pp. 177-183. 1999.

BENEVOLO, L. História da Cidade. Terceira Edição. Editora Perspectiva, São Paulo, SP. 728p., 2001.

CASTRO, C. et al. Governo do Estado do Rio de Janeiro Instituto Estadual do Ambiente Hélio Vanderlei Coelho Filho, diretor. mar. 2022.

CÂMARA, E. B.; BARBOSA, M. Y. T. Modelagem matemática de cheias urbanas na bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas, com foco no bairro Jardim Botânico. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2022.

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.

CLIMATEDATA. Dados Climatológicos do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-de-janeiro/rio-de-janeiro-853/#climate-graph>. Acesso em: 24 abr. 2023.



COMITÊ DE BACIA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DA BAÍA DE GUANABARA
E DOS SISTEMAS LAGUNARES DE JACAREPAGUÁ E MARICÁ.

RELATÓRIO DE TERRITORIALIDADE HÍDRICA Subcomitê do Sistema
Lagunar da Lagoa Rodrigo de Freitas 1ª Edição. Rio de Janeiro: [s.n.].

DERECZYNSKI, C. P.; CALADO, R. N.; DE BARROS, A. B. Chuvas Extremas
no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. Anuario do
Instituto de Geociencias, v. 40, n. 2, p. 17–30, 2017.

ENCICLOPÉDIA ITAÚ CULTURAL. Lagoa Rodrigo de Freitas, 1822 Henry
Chamberlain. Disponível em:
<https://enciclopedia.itaucultural.org.br/obra20127/lagoa-rodrigo-de-freitas>.
Acesso em: 24 abr. 2023.

FERREIRA, J. L. Proposta de Metodologia para Determinação Do Alinhamento
de Lagoas Urbanas Utilizando Tecnologias CAD/SIG/WEB:O Caso da Lagoa
Rodrigo de Freitas–Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade
Católica do Rio de Janeiro, set. 2014.

FONSECA, A. C. DE O. Estudo hidrológico-hidrodinâmico para mitigação de
inundações: estudo de caso do Centro Histórico do Município de Petrópolis - RJ
e a bacia hidrográfica do Rio Quintandinha. Rio de Janeiro: Pontifícia
Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2022.

FREITAS, J. C. As enchentes no Jardim Botânico. Rio de Janeiro: Editora X,
2022.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. PLANO DIRETOR DE DRENAGEM
PARA A BACIA DO RIO IGUAÇU NA REGIÃO METROPOLITANA DE
CURITIBA. Curitiba - PR: [s.n.].

GUHA-SAPIR, D.; SCALES, S. E. Challenges in public health and epidemiology
research in humanitarian settings: experiences from the field. BMC Public Health,
v. 20, n. 1, 1 dez. 2020.



HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. Geologia e Recursos Minerais do estado do Rio de Janeiro. Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2016.

HOLLIS, G. E. The Effect of Urbanization on Floods of Different Recurrence Interval. Water Resources Research. 1975, v 11, n 3: p. 431-435.

IBGE. Os dados mais recentes sobre a população de favelas na cidade do Rio de Janeiro. 2002.

IBGE. Cobertura vegetal e uso de terra. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/>

IBGE. Panorama da população Rio de Janeiro. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>. Acesso em: 24 abr. 2023.

INSTITUTO PEREIRA PASSO - IPP. Mapa distritos. Disponível em: <https://pt.riomap360.com/mapa-bairros-rio-de-janeiro>. Acesso em: 24 abr. 2023.

INEA. Sistema de Alerta de Cheias. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/>. Acesso em: 20 set, 2022.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/>. Acesso em: 13 abr. 2023.

Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Monitoramento da cobertura vegetal e uso da terra. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Coberturavegetaleusodaterra/index.htm&lang>>. Acesso em: 25 abr. 2023.



Jockey Club. (2021, setembro 9). O Jockey Club e seus 90 anos de história. Disponível em: <https://jbemfolhas.com.br/2021/09/09/o-jockey-club-e-seus-90-anos-de-historia/>. Acesso em: 13 abr. 2023.

LEE, J.; BEDNARZ, R. Effect of GIS learning on spatial thinking. *Journal of Geography in Higher Education*. 2009. p. 183-198.

MACHADO, A. B.; RIBEIRO, L. P. Indagando os “Modos de ver” da política urbana: O problema público do crescimento urbano na cidade do Rio de Janeiro. *GEOgraphia Niterói*, v. 21, 2019.

MIGUEZ, M. G. et al. Urban flood simulation using MODCEL—an alternative quasi-2D conceptual model. *Water*, v. 9, n. 6, p. 445, 2017.

MIGUEZ, M. G. Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. 2001. 410 f. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

MIGUEZ, M. G., VERÓL, A. P., REZENDE, O. M., 2016, *Drenagem Urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade*, 1ª edição, Elsevier, ISBN 978-85-352-7746-3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. Interações entre o rio dos macacos e a lagoa rodrigo de freitas sob a ótica dos problemas de drenagem urbana e ações integradas de revitalização ambiental. *Oecologia Australis*, v. 16, n. 3, p. 615–650, 2012.

MultiRio. Mata Atlântica: o bioma do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://multirio.rio.rj.gov.br/index.php/reportagens/1155-mata-atlantica-o-bioma-do-rio#:~:text=Mata%20Atl%C3%A2ntica%3A%20o%20bioma%20do%20Rio%20de%20Janeiro&text=A%20cidade%2C%20e%20tamb%C3%A9m%20todo,ricos%20do%20mundo%20em%20biodiversidade>. Acesso em: 13 abr. 2023.



NIMER, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE - Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2 ed., 421p, 1989

NORO, E. A. Sistema Combinado de Esgotamento Sanitário: Alternativa viabilizadora de sistemas de esgotos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

NUNES, D. M. Gestão das Águas Pluviais Urbanas e Elementos da Infraestrutura Verde: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UERJ, 2017.

OLIVEIRA, A. K. B. O Sistema de Drenagem como Eixo Estruturante do Planejamento Urbano: Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Acari. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

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, p. 2095-2105, 2019.

OLIVEIRA, A. K. B. Proposta de metodologia de simulação integrada das redes urbanas de drenagem pluvial e esgotamento sanitário. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2022.

OLIVEIRA, A. K. B. et al. Evaluating the Role of Urban Drainage Flaws in Triggering Cascading Effects on Critical Infrastructure, Affecting Urban Resilience. Infrastructures, v. 7, n. 11, p. 153, 2022.

OLIVEIRA, A. K. B. et al. A framework for assessing flood risk responses of a densely urbanized watershed, to support urban planning decisions. Sustainable And Resilient Infrastructure, v. 1, p. 1-19, 2023.

PLANO DIRETOR DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. Plano Diretor de Manejo de águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: [s.n.].



POLI, C. As causas e as formas de prevenção sustentáveis das enchentes urbanas. In: 2º Seminário Nacional de Construções Sustentáveis. Porto Alegre, RS, 2013.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: Gerenciamento do sistema de drenagem urbana. Volume 1 ed. São Paulo: [s.n.]. v. 1.

PROJETO IGUAÇU. RIO DONA EUGÊNIA, 2009.

REZENDE, O. M. Análise quantitativa da resiliência a inundações para o planejamento urbano: Caso da bacia do Canal do Mangue no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

RODRIGUES, A. E. M. Lagoa Rodrigo de Freitas/RJ: História de uma ocupação desordenada. *Oecologia Australis*, v. 16, n. 3, p. 339–352, 2012.

SANTA, F.; VISSIRINI, B.; WERNER, R. Sistema de alerta de cheias : uma ferramenta para o desenvolvimento. 2018. SNIS. Informações para Drenagem e o Manejo das Águas Pluviais Urbanas Drenagem e o Manejo das Águas Pluviais Urbanas. 2019.

SILVA, L. A. Controle de enchentes no bairro Jardim Botânico: evolução histórica e perspectivas futuras. Rio de Janeiro: Editora UFRRJ, 2005.

SILVEIRA, I. C. Estudo para controle de enchentes no bairro Água Santa. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

The Non-Covid year in disasters: Global trends and perspectives. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), in collaboration avec UN Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2021.

TUCCI, C.; BERTONI, J. Inundações Urbanas na América do Sul. Porto Alegre, RS, 2003. p. 1-6.



TUCCI, C. E. M., BERTONI, J.C. Inundações Urbanas na América do Sul, 1ª edição, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ISBN 85-88686-07-4, Porto Alegre, RS, Brasil.

WING, M.G.; BETTINGER, P. GIS: An updated primer on a powerful management tool, Journal of forestry. 2003. p. 4-8.